

UNIVERSIDAD MIGUÉL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE



TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE DIFERENTES  
PARÁMETROS EN LA RESISTENCIA A LA RODADURA  
DE LOS NEUMÁTICOS RECAUCHUTADOS

AUTOR: D. ÓSCAR CUADRADO SEMPERE  
DIRECTOR: DR. MIGUEL SÁNCHEZ LOZANO

Elche, julio 2017

Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica  
Doctorado en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación



# AUTORIZACIÓN DE LA PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL POR EL DIRECTOR

D. Miguel Sánchez Lozano, Profesor Titular del Área de Ingeniería Mecánica en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía de la Universidad Miguel Hernández de Elche,

## **Autoriza:**

La presentación de la Tesis Doctoral titulada “**Análisis de la influencia de diferentes parámetros en la resistencia a la rodadura de los neumáticos recauchutados**”, realizada por D. Óscar Cuadrado Sempere, bajo mi dirección y supervisión, en el Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica de la Universidad Miguel Hernández de Elche, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Miguel Hernández de Elche.

En Elche, a 22 de julio de 2017.

El Director de la Tesis:

Fdo. Dr. Miguel Sánchez Lozano





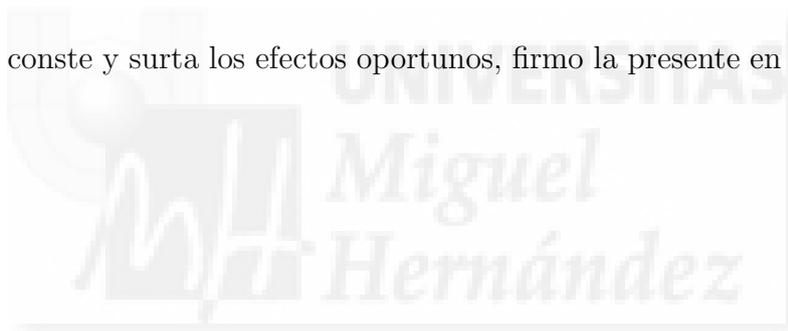
## CONFORMIDAD DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE MATERIALES, ÓPTICA Y TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Dña. PIEDAD DE AZA MOYA, Catedrática de Universidad y Directora del Departamento de Ciencia de materiales, Óptica y Tecnología Electrónica de la Universidad Miguel Hernández de Elche,

CERTIFICA,

Que el trabajo realizado por D. Óscar Cuadrado Sempere, titulado “**Análisis de la influencia de diferentes parámetros en la resistencia a la rodadura de los neumáticos recauchutados**”, ha sido dirigido por el Dr. Miguel Sánchez Lozano, realizado en el Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica, y se encuentra en condiciones de ser leído y defendido como Tesis Doctoral ante el correspondiente tribunal en la Universidad Miguel Hernández.

Y para que así conste y surta los efectos oportunos, firmo la presente en Elche, a 22 de julio de 2017.



Fdo. Dra. Piedad de Aza Moya



## AGRADECIMIENTOS

En las siguientes líneas, quisiera mostrar mi gratitud por toda la ayuda y apoyo recibido en la elaboración de esta tesis.

- En primer lugar, quería darle las gracias a Miguel Sánchez por todo tu esfuerzo, empeño, y tiempo dedicado; no solo como director y guía de esta tesis, también como gran compañero de trabajo y jefe, y por encima de todo gran persona; sin tu ayuda, aguante y comprensión, jamás hubiera imaginado tener la oportunidad de poder alcanzar el título de Doctor.
- En segundo lugar, quería dejar un agradecimiento muy especial a mi familia, sin cuya calidez y cariño el camino recorrido hubiera sido mucho más arduo. En especial a mis padres, que aunque no parecen tener claro que camino en la vida ha decidido tomar su hijo, siempre me han apoyado y han puesto todo lo que estaba en su manos para hacer realidad este sueño, os quiero. A mi “hermanito” Salva, que desde hace unos años se ha convertido en mi “brother”; todavía me emociono cuando pienso en mi sobrino Oscar, ¡lleva mi nombre en inglés!, jamás te arrepentirás, es un nombre precioso, alcanzará grandes logros, pero que te voy a decir yo... Por cierto, sabes que no habrá tierra ni mar suficiente que separe nuestras almas, te quiero. También a mis suegros y “cuñadicas/os”, por poner de vuestra parte todo el empeño necesario para que pudiera realizar esta tesis.
- A mi mujer, por soportar toda la carga en los peores momentos de la tesis y por aguantar todos esos momentos en que ha salido mi peor carácter. Gran mujer y mejor persona, madre por encima de todo de mis dos preciosos hijos, jamás imaginé que tu amor y cariño iban a hacer de mí mucho mejor persona. Gracias por tu apoyo, gracias por tu cariño, por todo tu amor y sobre todo por tu comprensión, gracias por los dos regalos que has traído a mi vida, por todo esto, gracias. Te amo y te quiero por encima de todas las cosas, y espero compartir pronto, de nuevo, las arenas blancas blancas del Caribe, las cristalinas aguas de su mar, el rubio de tu pelo ondeando al ritmo de la brisa, el moreno de tu piel bajo su sol abrasador, ...
- A mis hijos, por toda su comprensión y amor incondicional, que a pesar de que todavía sois muy pequeños, habéis sido conscientes de mis ausencias y por ello, siempre estaré en deuda con vosotros. Quería dejaros estas palabras por escrito: papá os quiere “muchísimo” y para mí sois increíblemente únicos, trataré de compensaros.

- Quiero agradecer también, a todos esos compañeros de trabajo que han puesto todo lo que estaba en su manos para ayudarme a alcanzar mis objetivos. Muchos de ellos, haciendo incluso más de lo que se espera de un compañero, lo que demuestra la calidad humana de las personas que forman el Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía. En especial, destacar toda la ayuda aportada, de una u otra forma, a Emilio, Miguel Ángel, Héctor, Abel, David C., Nuria, Carolina, Paco, Eva, Marcos, Darío, David A., Juan Carlos, Javier y muchos más, gracias a todos.
- A Arturo R. López, gran compañero de ensayos, por su dedicación, en muchos casos incondicional. Sin tu apoyo y fidelidad, no hubiera sido posible acabar con todos los ensayos de esta tesis. Gran compañero de batallas y mejor persona, siempre hiciste todo lo posible por estar al pié del banco de ensayos, fuese cual fuese el día y la hora. Por todo ello, te estaré siempre agradecido y espero, de corazón, que la vida te siga dando todo lo que te mereces.
- A mis amigos, porque aunque cada vez es más difícil juntaros a todos, habéis estado ahí para aguantar mis preocupaciones y mis manías. Pronto volveremos a las andadas, empezando por una cerveza bien fría.
- A Industrias del Neumático S.A., por su inestimable colaboración, su asesoramiento técnico y los materiales aportados, sin lo que no habría sido posible esta tesis.
- A la Cátedra Especial para la Investigación y la Formación sobre Neumáticos Reciclados de la Universidad Miguel Hernández (UMH) y a sus promotores Asociación Española de Neumáticos Reciclados (AER) y Tratamiento Neumáticos Usados (TNU), por la aportación de los fondos necesarios para la realización de parte de los ensayos.
- Por ultimo, no quería dejar de lado sin agradecer a todos los que, con mayor o menor esfuerzo, habéis hecho posible la realización de esta tesis y quizás, por mi mala memoria, he olvidado mencionar.

De corazón, gracias a todos.

Oscar Cuadrado  
Elche, 2017

A mi mujer, e hijos:

*Todo en el tiempo tiene su recompensa,  
toda recompensa es poca para una vida,  
el tiempo en mi vida no tendría sentido,  
si no fuerais vosotros la mía.*

*Óscar*



A Elche, mi pueblo, mi hogar:

*Ahí Elche sol y palmeras,  
la tierra donde nací,  
por donde quiera que vaya,  
mi canción es para ti.*

*[...]*

*¡Viva Elche, que es mi pueblo!*

*Pepe Tejera*



## RESUMEN

Una de las medidas encaminadas a la optimización de la energía y la reducción de las emisiones contaminantes es la reducción del consumo de combustible de los vehículos. Cobra especial interés y es uno de los objetivos prioritarios en el diseño de los vehículos, la reducción de la resistencia a la rodadura producida por los neumáticos del mismo. Por otro lado, el Reglamento (CE) 661/2009 [1], obliga a cumplir con unos requisitos mínimos en cuanto al Coeficiente de Resistencia a la Rodadura (CRR) de los neumáticos nuevos. Se puede estimar una reducción del 15 % en el CRR al aplicar estos requisitos. En cuanto a la reducción del CRR en los neumáticos recauchutados, la reglamentación no es de aplicación, pero menciona que en un futuro a corto o medio plazo, se podrá replantear esta situación. Pero más allá de su futura replanteación, la reducción de la resistencia a la rodadura de los neumáticos reciclados se presenta como una necesidad. La verificación del buen comportamiento medioambiental y energético de estos neumáticos, se convertirá en un argumento fundamental para poder mantener su amplia presencia actual en el mercado.

En cuanto al objetivo principal de la tesis, lo que se plantea es avanzar en el conocimiento del comportamiento de los neumáticos recauchutados en relación con su resistencia a la rodadura, y analizar la influencia de distintos parámetros en dicho comportamiento. La variedad de tipos, dimensiones y procesos constructivos de los neumáticos es amplísima, así como los factores de influencia que pueden afectar al CRR.

Para acotar el campo de estudio, en este trabajo se define una metodología de ensayo, adaptada a las necesidades del estudio; se valora la proporción que representa en la resistencia a la rodadura la influencia de la carcasa y la banda de rodadura del neumático; también se valora la influencia del estado de conservación, envejecimiento y propiedades de los materiales de las carcasas de los neumáticos usados, habitualmente utilizados como base en los neumáticos recauchutados; se valora, además, las diferencias obtenidas en la resistencia a la rodadura, debido el uso de diferentes compuestos en el material aportado a la banda de rodadura; y se analiza la relación entre la resistencia a la rodadura y otros parámetros como el peso o la cantidad de material aportado en el recauchutado.

La presente tesis ha sido desarrollada en un banco de ensayos tipo tambor de 1,7 m de diámetro, configurado en origen para la realización de los ensayos tipo carga-velocidad establecidos en los Reglamentos. Parte del trabajo realizado ha consistido en la adaptación del banco de ensayos y la creación de una metodología que permita la realización de los ensayos de resistencia a la rodadura, adaptada de forma específica al estudio de los neumáticos recauchutados.

Para lograr estos objetivos, en primer lugar, se realiza un análisis del estado del arte de los principales conceptos sobre los que se apoya este estudio. Para ello, se realiza un recorrido a través de la documentación recopilada de los principales autores y fabricantes que han participado en el desarrollo y la innovación de los neumáticos a lo largo de la historia, abordando los siguientes puntos: análisis del estado de la técnica en lo relacionado con la estructura, materiales utilizados y forma de fabricar neumáticos; análisis del estado de la técnica en lo relacionado con los materiales utilizados y forma de reutilizar los Neumáticos Fuera de Uso (NFU) para fabricar neumáticos recauchutados; principales propiedades y comportamiento de los neumáticos, en especial de la resistencia a la rodadura y otras propiedades que tienen relación directa con ella; parámetros que influyen en la resistencia a la rodadura de los neumáticos nuevos y de los factores que pueden, adicionalmente, influir en la de los neumáticos recauchutados; métodos de ensayo y análisis de la resistencia a la rodadura existentes; y por último, de la reglamentación o legislación asociada a los neumáticos y a la obtención del coeficiente de resistencia a la rodadura.

En cuanto a la fase experimental, se consigue independizar la influencia de distintos parámetros. Por un lado, ensayar neumáticos nuevos que luego se raspan y se recauchutan, ha permitido estudiar la diferencia de resistencia a la rodadura entre neumáticos nuevos y neumáticos recauchutados, así como la influencia de distintos compuestos de la banda de rodadura, sin que los resultados se vean influenciados por el estado de conservación de la carcasa. Por otro lado, ensayar neumáticos usados que luego se raspan y se recauchutan usando el mismo proceso y materiales en todos ellos, ha permitido valorar la influencia del estado de conservación de las carcasas utilizadas como punto de partida, eliminando la influencia de la banda de rodadura y el proceso empleado. En ambos casos, se han ensayado las carcasas raspadas antes de recauchutar, con el objetivo de valorar en cada caso la influencia relativa de la carcasa y la banda de rodadura.

Este estudio se ha realizado tanto para neumáticos de camión como para los de turismo. En neumáticos de camión, se han ensayado neumáticos de una misma medida y de un mismo fabricante, recauchutados por la misma empresa de recauchutado. En el caso de neumáticos de turismo, debido a su menor coste, se han ensayado neumáticos de dos fabricantes, pero también de una misma medida.

En último lugar, se realiza un análisis de los resultados, de los que se extraen interesantes conclusiones y finalmente, se plantean una serie de futuras líneas de investigación, que permitirán avanzar en el análisis del CRR de los neumáticos recauchutados.

**Palabras clave:** *resistencia a la rodadura, consumo, CO<sub>2</sub>, pérdidas, histéresis, neumático, recauchutado, carcasa, banda, turismo, camión, metodología, ensayo, deceleración, reproducibilidad, termografía, análisis, incertidumbre, estadístico.*

---

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>25</b>
1.1. Motivación . . . . .	27
1.2. Antecedentes . . . . .	30
1.3. Objetivos . . . . .	31
1.4. Metodología . . . . .	32
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>35</b>
2.1. Estructura, composición y fabricación de los neumáticos nuevos . . . . .	37
2.1.1. Generalidades del neumático . . . . .	37
2.1.2. Componentes de un neumático radial . . . . .	43
2.1.3. Fabricación de un neumático nuevo . . . . .	45
2.2. Estructura, composición y fabricación de los neumáticos recauchutados . . . . .	51
2.2.1. Generalidades del recauchutado . . . . .	51
2.2.2. Fabricación de un neumático recauchutado . . . . .	54
2.3. Resistencia a la rodadura . . . . .	58
2.3.1. Introducción . . . . .	58
2.3.2. Histéresis . . . . .	58
2.3.3. Mecanismo de fricción . . . . .	59
2.3.4. Explicación dinámica de la resistencia a la rodadura . . . . .	61
2.3.5. Punto de vista termodinámico . . . . .	62
2.3.6. Relación entre la resistencia a la rodadura y otras propiedades . . . . .	64
2.3.7. Relación entre las propiedades del neumático y la tangente de delta . . . . .	66
2.3.8. Nuevos materiales . . . . .	68
2.4. Factores que influyen en la resistencia a la rodadura de neumáticos nuevos . . . . .	69
2.4.1. Factores asociados a los neumáticos nuevos . . . . .	69
2.4.2. Factores adicionales asociados al recauchutado . . . . .	78
2.5. Métodos de ensayo de neumáticos en laboratorio . . . . .	83
2.5.1. Métodos de medición en banco . . . . .	84
2.5.2. Principales normas de ensayo . . . . .	89
2.6. Otros métodos de ensayo . . . . .	94
2.6.1. Método de remolque . . . . .	94
2.6.2. Método Coast-Down . . . . .	95

2.6.3.	Método de consumo de combustible . . . . .	95
2.6.4.	Método de análisis por elementos finitos (MEF-FEA) . . . . .	95
2.7.	Legislación asociada . . . . .	96
2.7.1.	Reglamento (CE) n° 661/2009 . . . . .	96
2.7.2.	Reglamento (CE) n° 1222/2009 . . . . .	97
<b>3.</b>	<b>Definición del plan de ensayos</b>	<b>99</b>
3.1.	Desarrollo, análisis y ajuste del método de ensayo . . . . .	101
3.1.1.	Selección de la norma . . . . .	101
3.1.2.	Aplicación de la norma ISO 28580 al banco de ensayos de la UMH . . . . .	101
3.1.3.	Análisis y definición del ensayo de pérdidas . . . . .	104
3.1.4.	Análisis de la reproducibilidad del método . . . . .	106
3.1.5.	Análisis de la incertidumbre del método . . . . .	111
3.1.6.	Medidas termográficas . . . . .	112
3.1.7.	Definición detallada del procedimiento de ensayo . . . . .	116
3.2.	Plan de ensayos . . . . .	124
3.2.1.	Introducción al plan de ensayo . . . . .	124
3.2.2.	Plan de ensayos sobre neumáticos de camión (C3) . . . . .	125
3.2.3.	Plan de ensayos sobre neumáticos de turismo (C1) . . . . .	128
<b>4.</b>	<b>Resultados y discusión</b>	<b>131</b>
4.1.	Introducción . . . . .	133
4.2.	Ensayos sobre neumáticos de camión . . . . .	133
4.2.1.	Ensayos sobre neumáticos nuevos (Fase 1) . . . . .	133
4.2.2.	Ensayos sobre carcassas nuevas raspadas (Fase 2) . . . . .	134
4.2.3.	Ensayos sobre neumáticos nuevos recauchutados (Fase 3) . . . . .	135
4.2.4.	Ensayos sobre neumáticos usados (Fase 1) . . . . .	137
4.2.5.	Ensayos sobre carcassas usadas raspadas (Fase 2) . . . . .	139
4.2.6.	Ensayos sobre neumáticos usados recauchutados (Fase 3) . . . . .	140
4.2.7.	Análisis comparativo de los resultados de camión . . . . .	141
4.3.	Ensayos sobre neumáticos de turismo . . . . .	150
4.3.1.	Ensayos sobre neumáticos nuevos (Fase 1) . . . . .	150
4.3.2.	Ensayos sobre carcassas nuevas raspadas (Fase 2) . . . . .	150
4.3.3.	Ensayos sobre neumáticos nuevos recauchutados (Fase 3) . . . . .	151
4.3.4.	Ensayos sobre neumáticos usados (Fase 1) . . . . .	152
4.3.5.	Ensayos sobre carcassas usadas raspadas (Fase 2) . . . . .	153
4.3.6.	Ensayos sobre neumáticos usados recauchutados (Fase 3) . . . . .	154
4.3.7.	Análisis comparativo de los resultados de turismo . . . . .	154
4.4.	Análisis estadístico de los resultados . . . . .	161
4.5.	Análisis del CRR a distintas velocidades . . . . .	170
4.6.	Extrapolación de los resultados obtenidos a otros tipos de neumáticos . . . . .	171

<b>5. Conclusiones y principales aportaciones</b>	<b>173</b>
<b>6. Futuras líneas de investigación</b>	<b>179</b>
<b>A. Tablas de resultados</b>	<b>183</b>
A.1. Relación de neumáticos y muestras . . . . .	185
A.1.1. Fase 1, fase 2 y fase 3 - Nuevos y usados . . . . .	185
A.2. Mediciones . . . . .	186
A.2.1. Fase 1 – Neumáticos en estado de partida . . . . .	186
A.2.2. Fase 2 – Neumáticos raspados . . . . .	187
A.2.3. Fase 3 – Neumáticos recauchutados . . . . .	188
A.3. Resultados . . . . .	189
A.3.1. Fase 1 – Neumáticos en estado de partida . . . . .	189
A.3.2. Fase 2 – Neumáticos raspados . . . . .	190
A.3.3. Fase 3 – Neumáticos recauchutados . . . . .	191
A.4. Imágenes de las muestras . . . . .	192
A.4.1. Fase 1 – Neumáticos en estado de partida . . . . .	192
A.4.2. Fase 2 – Neumáticos raspados . . . . .	194
A.4.3. Fase 3 – Neumáticos recauchutados . . . . .	196
<b>B. Análisis de la incertidumbre de la medida</b>	<b>199</b>
B.1. Cálculo de la incertidumbre debida a los equipos de medida . . . . .	201
B.1.1. Introducción . . . . .	201
B.1.2. Cálculo de $u_c^2(X_f)$ . . . . .	205
B.1.3. Cálculo de $u_c^2(R)$ . . . . .	205
B.1.4. Cálculo de $u_c^2(R_{r0})$ . . . . .	206
B.1.5. Cálculo de $u_c^2(R_r)$ . . . . .	207
B.1.6. Cálculo de $u_c^2(K_{r25})$ . . . . .	207
B.1.7. Cálculo de $u_c^2(K_d)$ . . . . .	208
B.1.8. Cálculo de $u_c^2(K_{fc})$ . . . . .	208
B.1.9. Cálculo de $u_c^2(I_T)$ . . . . .	209
B.1.10. Cálculo de $u_c^2(I_D)$ . . . . .	210
B.1.11. Cálculo de $u_c^2(j_V)$ . . . . .	210
B.1.12. Cálculo de $u_c^2(j_{V0})$ . . . . .	212
B.1.13. Cálculo de $u_c^2(L_D)$ . . . . .	213
B.1.14. Cálculo de $u_c^2(L_T)$ . . . . .	214
B.1.15. Cálculo de $u_c^2(L_{D0})$ . . . . .	215
B.1.16. Cálculo de $u_c^2(L_{T0})$ . . . . .	215
B.1.17. Cálculo de $u_c^2(CRR)$ . . . . .	216
B.1.18. Resultado final de la incertidumbre . . . . .	218
B.2. Otras fuentes de incertidumbre . . . . .	218
B.2.1. Introducción . . . . .	218

B.2.2. Montaje del neumático . . . . .	219
B.2.3. Montaje del conjunto en máquina de ensayo . . . . .	219
B.2.4. Presión . . . . .	220
B.3. Conclusión . . . . .	221
<b>C. Análisis estadístico de los resultados</b>	<b>223</b>
C.1. Introducción . . . . .	225
C.2. Estadísticos descriptivos . . . . .	226
C.3. Pruebas de normalidad . . . . .	227
C.4. Pruebas de homogeneidad y robustez de las varianzas . . . . .	231
C.4.1. Varianza entre repeticiones . . . . .	231
C.4.2. Varianza entre dos muestras . . . . .	232
C.5. Pruebas ANOVA . . . . .	233
C.6. Pruebas T para 2 muestras independientes . . . . .	234
C.7. Posprocesado Tukey de ANOVA . . . . .	235
C.8. Análisis de covarianzas . . . . .	239
<b>Bibliografía</b>	<b>243</b>



---

# Índice de figuras

1.1. Diagrama de flujo de energía . . . . .	27
1.2. Resistencia a la rodadura global de un vehículo . . . . .	28
2.1. Principales zonas de un neumático . . . . .	37
2.2. Principales dimensiones de un neumático . . . . .	39
2.3. Principales estructuras de un neumático . . . . .	40
2.4. Principales partes de un neumático radial . . . . .	43
2.5. Proceso de fabricación de un neumático . . . . .	45
2.6. Tambor rotatorio para fabricar neumáticos . . . . .	48
2.7. Prensa y molde de vulcanizado . . . . .	50
2.8. Vertedero de NFU . . . . .	51
2.9. Mercado de recauchutados de camión ETRMA . . . . .	52
2.10. Cubierta, carcasa y neumático recauchutado . . . . .	53
2.11. Llegada a planta de tratamiento de NFU . . . . .	54
2.12. Recauchutado en frío . . . . .	56
2.13. Recauchutado en caliente . . . . .	57
2.14. Mecanismo de histéresis . . . . .	59
2.15. Tipos de fricción . . . . .	60
2.16. Diagrama de solido libre de un neumático . . . . .	62
2.17. Gráficos en forma de tela de araña . . . . .	64
2.18. Triángulo mágico . . . . .	65
2.19. Relación entre la tangente de delta y la frecuencia . . . . .	67
2.20. Curva tangente delta y temperatura . . . . .	67
2.21. Ensayo tangente de delta . . . . .	68
2.22. Curva de temperatura interna y temperatura ambiente . . . . .	69
2.23. Temperatura y pérdidas durante el calentamiento . . . . .	71
2.24. Variación del CRR con la presión . . . . .	72
2.25. Variación del CRR con la capacidad de carga . . . . .	72
2.26. Variación del CRR con la velocidad . . . . .	73
2.27. Variación del CRR con diámetro exterior . . . . .	74
2.28. Variación del CRR con el ancho de la sección . . . . .	75
2.29. Variación del CRR con el espesor de banda . . . . .	76

2.30. Diferencia entre macro y micro rugosidad . . . . .	78
2.31. Variación del CRR con el estado de la carcasa . . . . .	79
2.32. Ejemplos de bancos de ensayo . . . . .	83
2.33. Esquema de funcionamiento bando de ensayos . . . . .	83
2.34. Comparación de pérdidas en banco de ensayo . . . . .	85
2.35. Principales métodos de ensayos en banco . . . . .	93
2.36. Secuencia de modelización por elementos finitos . . . . .	96
2.37. Etiquetado europeo de neumáticos . . . . .	98
3.1. Banco de ensayos de la UMH . . . . .	102
3.2. Configuración del método de fuerza en banco de ensayos UMH . . . . .	103
3.3. Comparación de la emisividad con termopar . . . . .	113
3.4. Comparación de la emisividad con cámara termográfica . . . . .	114
3.5. Ejemplo de radiador Lambert . . . . .	114
3.6. Ejemplo termografía de neumático C3 . . . . .	115
3.7. Ejemplo termografía de neumático C1 . . . . .	116
3.8. Diagrama plan de ensayo C3 . . . . .	126
3.9. Diagrama plan de ensayo C1 . . . . .	129
4.1. Comparación del CRR entre compuestos . . . . .	137
4.2. Principales propiedades entre fases . . . . .	142
4.3. Diferencia del CRR entre nuevos y recauchutados . . . . .	143
4.4. Diferencia del CRR entre recauchutado en caliente y en frío . . . . .	144
4.5. Diferencia del CRR entre subgrupos de neumáticos usados . . . . .	145
4.6. CRR y Masa de carcasa nuevas y usadas comparadas tras el recauchutado . . . . .	146
4.7. Contribución de la banda y la carcasa del neumático al CRR . . . . .	147
4.8. Diferencia del CRR entre neumáticos nuevos y neumáticos recauchutados sobre carcasas usadas . . . . .	149
4.9. Principales propiedades entre fases . . . . .	155
4.10. CRR y la masa entre neumáticos nuevos y recauchutados . . . . .	156
4.11. CRR entre fabricantes . . . . .	157
4.12. CRR y masa entre los mismos fabricantes . . . . .	158
4.13. Contribución de la banda y la carcasa del neumático al CRR . . . . .	159
4.14. Gráficas de contraste de normalidad turismo . . . . .	163
4.15. Gráficas de contraste de normalidad camión . . . . .	164
4.16. Variación del CRR de camión con la velocidad . . . . .	170
4.17. Variación del CRR de turismo con la velocidad . . . . .	171
A.1. Imágenes muestras C3_N . . . . .	192
A.2. Imágenes muestras C3_U . . . . .	192
A.3. Imágenes muestras C1_N1 . . . . .	193
A.4. Imágenes muestras C1_N2 . . . . .	193

A.5. Imágenes muestras C1_U . . . . .	194
A.6. Imágenes muestras C3_N_RASP y C3_U_RASP . . . . .	194
A.7. Imágenes muestras C1_N1_RASP . . . . .	195
A.8. Imágenes muestras C1_N2_RASP . . . . .	195
A.9. Imágenes muestras C1_U_RASP . . . . .	195
A.10. Imágenes muestras C3_N_REC1, C3_N_REC2, C3_N_REC3 y C3_U_REC . . . . .	196
A.11. Imágenes muestras C3_N_REC4 . . . . .	196
A.12. Imágenes muestras C1_N1_REC . . . . .	197
A.13. Imágenes muestras C1_N2_REC . . . . .	197
A.14. Imágenes muestras C1_U_REC . . . . .	197
B.1. Ejemplo exactitud y precisión de la medida . . . . .	221



---

# Índice de Tablas

2.1. Tabla de exigencias en materia de CRR . . . . .	97
2.2. Clase de etiqueta del CRR . . . . .	98
3.1. Principales características del banco de ensayos de la UMH . . . . .	102
3.2. Pérdidas medidas tras el ensayo de resistencia a la rodadura de turismo . . . . .	106
3.3. Pruebas reproducibilidad C1 (1 de 3) . . . . .	107
3.4. Pruebas reproducibilidad C1 (2 de 3) . . . . .	108
3.5. Pruebas reproducibilidad C1 (3 de 3) . . . . .	108
3.6. ANOVA pruebas reproducibilidad C1 . . . . .	109
3.7. Pruebas reproducibilidad C3 (1 de 3) . . . . .	109
3.8. Pruebas reproducibilidad C3 (2 de 3) . . . . .	110
3.9. Pruebas reproducibilidad C3 (3 de 3) . . . . .	110
3.10. ANOVA pruebas previas C3 . . . . .	111
3.11. Tabla de emisividad . . . . .	113
3.12. Etapas de ensayos C1 . . . . .	121
3.13. Etapas de ensayos C3 . . . . .	122
3.14. Propiedades reológicas de los compuestos . . . . .	128
4.1. Resultados neumáticos nuevos (Fase 1) . . . . .	134
4.2. Resultados carcasas nuevas (Fase 2) . . . . .	134
4.3. Resultados neumáticos recauchutados sobre carcasas nuevas (Fase 3) . . . . .	135
4.4. Subconjuntos homogéneos de Tukey para análisis de compuestos . . . . .	136
4.5. Resultados neumáticos usados (Fase 1) . . . . .	138
4.6. Resultados neumáticos usados (Fase 1), agrupados por tipo . . . . .	138
4.7. Resultados carcasas usadas (Fase 2) . . . . .	139
4.8. Resultados carcasas usadas (Fase 2), agrupados por tipo . . . . .	140
4.9. Resultados neumáticos recauchutados sobre carcasas usadas (Fase 3) . . . . .	140
4.10. Resultados medios muestras de camión . . . . .	141
4.11. Resultados neumáticos nuevos (Fase 1) . . . . .	150
4.12. Resultados carcasas nuevas (Fase 2) . . . . .	151
4.13. Resultados neumáticos recauchutados sobre carcasas nuevas (Fase 3) . . . . .	151
4.14. Resultados neumáticos usados (Fase 1) . . . . .	152
4.15. Resultados carcasas usadas (Fase 2) . . . . .	153

4.16. Resultados neumáticos recauchutados sobre carcasas usadas (Fase 3) . . . . .	154
4.17. Resultados neumáticos recauchutados sobre carcasas usadas (Fase 3) . . . . .	155
4.18. Resultados pruebas de normalidad muestras de camión . . . . .	162
4.19. Resultados pruebas de normalidad muestras de turismo . . . . .	162
4.20. Principales correlaciones de camión . . . . .	165
4.21. Principales correlaciones de turismo . . . . .	166
4.22. Posprocesado HSD de Tukey del CRR para camión . . . . .	167
4.23. Posprocesado HSD de Tukey de la masa para camión . . . . .	167
4.24. Posprocesado HSD de Tukey del diámetro exterior para camión . . . . .	168
4.25. Posprocesado HSD de Tukey del CRR para turismo . . . . .	168
4.26. Posprocesado HSD de Tukey de la masa para turismo . . . . .	168
4.27. Posprocesado HSD de Tukey del diámetro exterior para turismo . . . . .	169
4.28. Posprocesado HSD de Tukey de la temperatura de banda para turismo . . . . .	169
4.29. Resultados de otras muestras de camión ensayadas . . . . .	171
A.1. Relación de neumáticos y muestras fase 1, fase 2 y fase 3, nuevos y usados . . . . .	185
A.2. Mediciones fase 1: Neumáticos en estado de partida . . . . .	186
A.3. Mediciones fase 2: Neumáticos raspados . . . . .	187
A.4. Mediciones fase 3: Neumáticos recauchutados . . . . .	188
A.5. Resultados fase 1: Neumáticos en estado de partida . . . . .	189
A.6. Resultados fase 2: Neumáticos raspados . . . . .	190
A.7. Resultados fase 3: Neumáticos recauchutados . . . . .	191
B.1. Tabla de dependencias, unidades y referencias de incertidumbres . . . . .	204
C.1. Estadísticos descriptivos CRR de camión - Pruebas previas para un ensayo de pérdidas . . . . .	226
C.2. Estadísticos descriptivos CRR de camión - Pruebas previas para tres ensayos de pérdidas . . . . .	226
C.3. Estadísticos descriptivos CRR de turismo - Pruebas previas para tres ensayos de pérdidas . . . . .	226
C.4. Estadísticos descriptivos del CRR de todas las muestras de camión . . . . .	227
C.5. Estadísticos descriptivos del CRR de todas las muestras de turismo . . . . .	227
C.6. Normalidad del CRR pruebas previas un ensayo de pérdidas . . . . .	228
C.7. Normalidad del CRR de camión - Pruebas previas tres ensayos de pérdidas . . . . .	228
C.8. Normalidad del CRR de turismo - Pruebas previas tres ensayos de pérdidas (1 de 2) . . . . .	229
C.9. Normalidad del CRR de turismo - Pruebas previas tres ensayos de pérdidas (2 de 2) . . . . .	230
C.10. Normalidad del CRR de todas las muestras de camión . . . . .	230
C.11. Normalidad del CRR de todas las muestras de turismo . . . . .	230

C.12.Homogeneidad y robustez de la varianza del CRR de las pruebas previas de camión . . . . .	231
C.13.Homogeneidad y robustez de la varianza del CRR de las pruebas previas de turismo . . . . .	231
C.14.Homogeneidad y robustez de la varianza del CRR de todas las muestras de camión . . . . .	232
C.15.Homogeneidad y robustez de la varianza del CRR de todas las muestras de turismo . . . . .	233
C.16.ANOVA del CRR de las pruebas previas de camión . . . . .	233
C.17.ANOVA del CRR de las pruebas previas de turismo . . . . .	234
C.18.Pruebas T del CRR de todas las muestras ensayadas de camión . . . . .	235
C.19.Pruebas T del CRR de todas las muestras ensayadas de turismo . . . . .	235
C.20.Posprocesado HSD de Tukey del CRR para camión . . . . .	236
C.21.Posprocesado HSD de Tukey de la masa para camión . . . . .	236
C.22.Posprocesado HSD de Tukey del diámetro exterior para camión . . . . .	237
C.23.Posprocesado HSD de Tukey del CRR para turismo . . . . .	237
C.24.Posprocesado HSD de Tukey de la masa para turismo . . . . .	237
C.25.Posprocesado HSD de Tukey del diámetro exterior para turismo . . . . .	238
C.26.Posprocesado HSD de Tukey de la temperatura de banda para turismo . . . . .	238
C.27.Análisis de covarianzas de camión . . . . .	240
C.28.Análisis de covarianzas de turismo . . . . .	241

---

# Acrónimos

<b>AER</b>	Asociación Española de Neumáticos Reciclados
<b>ANOVA</b>	<i>“ANalysis Of VAriance”</i>
<b>CRR</b>	Coefficiente de Resistencia a la Rodadura
<b>EEUU</b>	Estados Unidos
<b>ENAC</b>	Entidad Nacional de Acreditación
<b>ETRMA</b>	<i>“European Tyre and Rubber Manufacturers' Association”</i>
<b>ETRTO</b>	<i>“European Tyre and Rim Technical Organisation”</i>
<b>FRR</b>	Fuerza Resistente a la Rodadura
<b>MERF</b>	<i>“Mean Equivalent Rolling Force”</i>
<b>MIRIAM</b>	<i>“Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management systems”</i>
<b>MRUA</b>	Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado
<b>NFU</b>	Neumáticos Fuera de Uso
<b>NHTSA</b>	<i>“National Highway Traffic Safety Administration”</i>
<b>RETYRE</b>	<i>“Retreaded Tyres Project”</i>
<b>SMERF</b>	<i>“Standard Mean Equivalent Rolling Force”</i>
<b>SPSS</b>	<i>“Statistical Package for the Social Sciences”</i>
<b>TNU</b>	Tratamiento Neumáticos Usados
<b>TRA</b>	<i>“The Tire and Rim Association”</i>
<b>UE</b>	Unión Europea
<b>UMH</b>	Universidad Miguel Hernández



---

# Capítulo 1

## Introducción





## 1.1. Motivación

Una de las medidas encaminadas a la optimización de la energía y la reducción de las emisiones contaminantes es la reducción del consumo de combustible de los vehículos, cuyo objetivo principal es la reducción del calentamiento global [2]. Cobra especial interés y es uno de los objetivos prioritarios en el sector del transporte de mercancías y en el sector privado del transporte de pasajeros, el diseño de los vehículos y de sus partes enfocados a reducir el consumo de combustible.

No solo como argumento medioambiental, esta reducción de consumo causa especial reclamo en las empresas del sector del transporte, ya que apareja una reducción de los costes de desplazamiento de las mercancías. Por otro lado, existe un mercado de vehículos de pasajeros a los que también les interesa reducir los costes por kilómetro recorrido. Mencionar también que, además, estamos ante un mercado creciente de vehículos eléctricos donde la reducción del consumo o el aumento de autonomía, juegan un papel muy importante.

Existen numerosas investigaciones que enfocan su atención en reducir el consumo a través de la reducción de la resistencia a la rodadura. Entre ellos, un estudio reciente [3], donde se analiza el consumo general del vehículo a través de simulaciones de ciclos de consumo y de donde está extraído el diagrama de flujo de la figura 1.1. Es este estudio, se considera que las pérdidas por resistencia a la rodadura asociado a los neumáticos de un camión pesado (incluido las pérdidas asociadas al ciclo térmico y fricciones del motor o dicho de otra manera, con el motor acoplado al sistema de transmisión del vehículo), pueden llegar a contribuir desde un 25 % a un 30 % al consumo de combustible del vehículo. Además, se estima que una reducción de un 5 % en la resistencia a la rodadura del vehículo, reduce cerca de un 1,5 % el consumo de combustible. Todo lo anterior indica que, trabajando sobre la mejora de la resistencia a la rodadura de un vehículo, se pueden reducir gran cantidad de la energía consumida por el mismo.

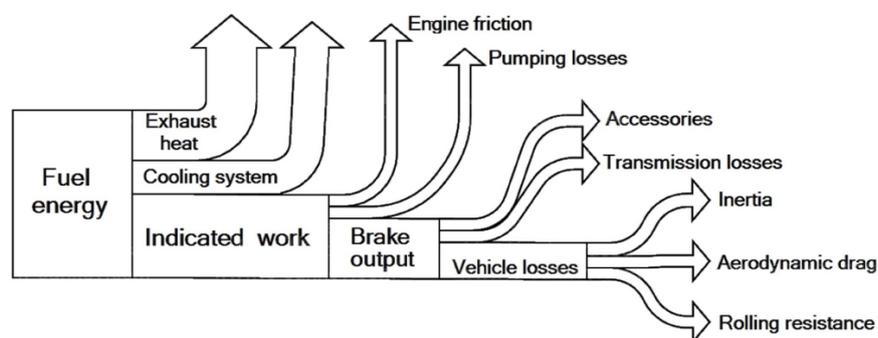


Figura 1.1: Diagrama de flujo de energía

En este sentido, los neumáticos parecen tener poca influencia en el consumo de combustible, y debido a ello, puede parecer poco relevante investigar en cómo disminuir esta influencia, pero debemos tener en cuenta que cualquier reducción de consumo se transforma en una menor demanda de energía para el motor y, por tanto, indirectamente, estaremos también

reduciendo la demanda de energía al motor y con ello sus pérdidas.

Por otro lado, uno de los mayores estudios publicado recientemente, habla sobre la influencia de la resistencia a la rodadura del vehículo, realizando las mediciones en circulación en carretera. Es el conocido como el proyecto “*Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management systems*” (MIRIAM)[4], donde se muestran las pérdidas de energía debidas a la conducción (*Driving Resistance*), tanto para vehículos de pasajeros como para camiones. Podemos sacar conclusiones asociadas a la resistencia a la rodadura de los neumáticos de este estudio, ya que hace un análisis de las pérdidas por resistencia al avance del vehículo asociadas a la conducción de un vehículo en carretera, en la que están incluidas la resistencia a la rodadura. A diferencia del estudio anterior, no se tienen en cuenta las pérdidas mecánicas asociadas al motor. Esto se debe a que los ensayos habituales se realizan sin aplicar potencia al motor y con la transmisión desacoplada.

En la figura 1.2, extraída del informe final MIRIAM[4], podemos ver como el estudio diferencia entre cinco componentes asociados a la resistencia a la rodadura del vehículo: en morado, la resistencia aerodinámica que es creciente con la velocidad; en verde, la pérdidas de energía consumida en amortiguadores y antivibratorios (silentbloks); en rojo, la componente de la resistencia a la rodadura del vehículo que tienen alta correlación con los efectos de la histéresis debida a la macrorrugosidad del pavimento; en azul, la componente de la resistencia a la rodadura del vehículo que es independiente de otros parámetros como la velocidad y por último en celeste, las pérdidas debidas a los elementos de la transmisión que giran libremente al desacoplar el motor.

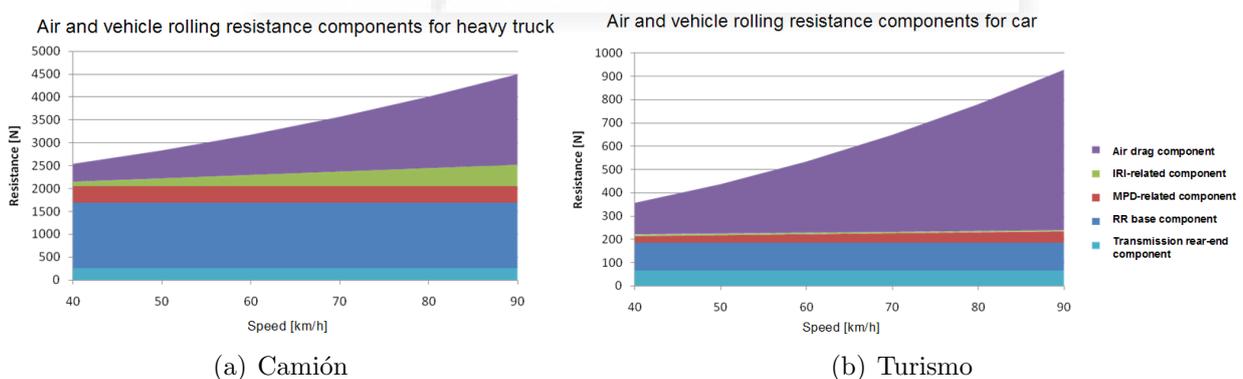


Figura 1.2: Resistencia a la rodadura global de un vehículo

En este estudio se estima la resistencia a la rodadura de los neumáticos de la siguiente forma: como la suma de la resistencia a la rodadura del vehículo, que tienen alta correlación con la rugosidad del pavimento, más la parte de la resistencia a la rodadura del vehículo, que no guardan correlación con otros parámetros estudiados, incluyendo la velocidad, colores rojo y azul de las gráficas de la figura 1.2. Analizando los resultados mostrados por esta figura, podemos calcular que, aproximadamente para una velocidad de 80 km/h, el 44 % de las pérdidas puede estar asociado a los neumáticos de un camión pesado, frente al 20 % en el caso de neumáticos de un turismo.

Por tanto, tras estos pequeños análisis, podemos dar por válida la consideración de que la resistencia a la rodadura de los neumáticos es uno de los factores de mayor influencia en el consumo de combustible de un vehículo.

Por otro lado, y en relación con la reducción de emisiones contaminantes, el Reglamento (CE) 661/2009 [1], obliga a cumplir con unos requisitos mínimos en cuanto al CRR de los neumáticos. En este reglamento, se establecen dos fases de acción escalonadas en el tiempo, de las cuales se puede estimar una reducción del 15 % en el CRR al pasar de la primera a la segunda fase.

Teniendo en cuenta estos requisitos y la reducción de consumo estimada anteriormente en el estudio [3], cumplir con las exigencias de la reglamentación podría suponer una reducción de consumo de combustible, en algunos casos, de hasta un 5 %.

Por otra parte, están tomando relevo a los neumáticos habituales, los conocidos como neumáticos de baja resistencia a la rodadura, cuyos valores de CRR están por debajo de los valores que especifica el Reglamento CE [1], rondando los 5 kg/t en algunos casos los neumáticos habituales de camión. Esto podría reflejarse en otro 15 % de reducción con respecto al valor más bajo de los coeficientes que marca el Reglamento CE [1], lo que supondría a su vez una reducción adicional de 5 % de consumo de combustible.

Aunque esto ya es un presente, el mercado de los neumáticos de baja resistencia a la rodadura están en desarrollo y todavía existen numerosas investigaciones en este sentido para conseguir que estos neumáticos tengan las mismas prestaciones que los neumáticos convencionales o que se adapten a las características concretas de un tipo de vehículo.

Un ejemplo del resultado de las acciones reguladoras y administrativas implantadas durante los últimos años, se muestra en uno de los estudios más actuales, [5]. Publicado en diciembre de 2016, este estudio proporciona datos históricos de 10 años (2004-14) de resultados del CRR en Estados Unidos (EEUU) y los compara con los datos del mercado en Unión Europea (UE) en 2013, donde la correlación entre mercados es muy próxima. En el apéndice B de este informe, podemos observar las gráficas del CRR de los neumáticos por distintos segmentos (M1 y N1  $\leq$  3500kg), cuya evolución es decreciente y acorde con las expectativas del Reglamento (CE) 661/2009 [1] para 2012, siendo la tendencia decreciente adecuada para cumplir con las expectativas para el 2016. En este caso, los datos representan el conjunto de neumáticos de turismo y camión ligero, excluyendo los de camión pesado. Pero existen otros estudios donde la evolución y las expectativas son equivalentes, [6].

Finalmente, a la hora de valorar la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> hay que analizar el balance energético asociado a toda la vida útil del neumático. Desde su fabricación, pasando por una segunda etapa de vida de recauchutado, en ocasiones una tercera y hasta su destrucción definitiva, el neumático pasa por diferentes fases de consumo de energético. Es

lo que se conoce como análisis energético del ciclo de vida de un producto.

En este tipo de análisis, un segundo, o incluso un tercer uso de la carcasa para recauchutado de un neumático alarga notablemente la vida del mismo. El recauchutado de neumáticos es un proceso de fabricación que puede aprovechar hasta el 70 % de la energía empleada en fabricar un neumático nuevo. O lo que es lo mismo que, fabricar un neumático recauchutado requiere aproximadamente un 30 % más de energía que un neumático nuevo.

Resulta por tanto interesante, desde un punto de vista ambiental, tratar de aprovechar al máximo estos neumáticos y trabajar en la reducción del CRR tratando de mejorar los compuestos del caucho añadido, los dibujos de banda, las carcasas y los procesos de recauchutado. De hecho, los neumáticos recauchutados están sometidos a un proceso de homologación equivalente a los neumáticos nuevos, en lo relativo a su seguridad, y deben superar las mismas exigencias de carga y velocidad.

En cuanto a la reducción del CRR en los neumáticos recauchutados, la reglamentación no es de aplicación, pero menciona que en un futuro a corto o medio plazo, se podrá replantear esta situación. Pero más allá de su futura replanteación, la reducción de la resistencia a la rodadura de los neumáticos reciclados se presenta como una necesidad. La verificación del buen comportamiento medioambiental y energético de estos neumáticos, se convertirá en un argumento fundamental para poder mantener su amplia presencia actual en el mercado.

## 1.2. Antecedentes

La presente tesis ha sido desarrollada en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía, de la Universidad Miguel Hernández de Elche, en el Grupo de Investigación “Ingeniería Mecánica Aplicada”. El grupo cuenta con un banco de ensayos tipo tambor de 1,7 m de diámetro, configurado en origen para la realización de los ensayos tipo carga-velocidad establecidos en los Reglamentos CEPE/ONU números 30 [7], 54 [8], 108 [9] y 109 [10], y cuyos procedimientos de ensayo según dichos reglamentos están acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) [11], según la Norma UNE-EN ISO/IEC 17025 [12].

El banco de ensayos no fue concebido para la realización de ensayos de resistencia a la rodadura. Por tanto, se ha tenido que adaptar para la realización de los ensayos realizados en este estudio.

Parte del trabajo realizado por el doctorando ha consistido en la adaptación del banco de ensayos y la creación de una metodología que permita la realización de los ensayos de resistencia a la rodadura, adaptada de forma específica al estudio de los neumáticos recauchutados.

### 1.3. Objetivos

El objetivo principal de la tesis es avanzar en el conocimiento del comportamiento de los neumáticos recauchutados en relación con su resistencia a la rodadura, y analizar la influencia de distintos parámetros en dicho comportamiento.

La variedad de tipos, dimensiones y procesos constructivos de los neumáticos es amplísima, por tanto, también son muchos los posibles factores que pueden influir en su comportamiento. Por una cuestión práctica, se hace necesario acotar el campo de estudio de este trabajo y se plantean los siguientes objetivos parciales:

- Definir una metodología de ensayo, para lo que es necesario realizar un análisis comparativo de los diferentes métodos de medida a la resistencia a la rodadura existentes, seleccionar el que mejor se ajusta a las necesidades de estudio y medios de ensayo disponibles, y proponer, en su caso, mejoras para el método.
- Valorar la proporción que representa en la resistencia a la rodadura la influencia de la carcasa y la banda de rodadura del neumático.
- Valorar la influencia del estado de conservación, envejecimiento y propiedades de los materiales de las carcasas de los neumáticos usados, habitualmente utilizados como base en los neumáticos recauchutados.
- Valorar las diferencias obtenidas en la resistencia a la rodadura, debido el uso de diferentes compuestos en el material aportado a la banda de rodadura.
- Analizar la relación entre la resistencia a la rodadura y otros parámetros como el peso o la cantidad de material aportado en el recauchutado.

## 1.4. Metodología

### Análisis del estado del arte

En primer lugar, realizaremos un análisis del estado del arte de los principales conceptos sobre los que se apoya este estudio. Para ello, tendremos que hacer un recorrido a través de la documentación recopilada de los principales autores y fabricantes que han participado en el desarrollo y la innovación de los neumáticos a lo largo de la historia, abordando los siguientes puntos:

- Análisis del estado de la técnica en lo relacionado con la estructura, materiales utilizados y forma de fabricar neumáticos.
- Análisis del estado de la técnica en lo relacionado con los materiales utilizados y forma de reutilizar los NFU para fabricar neumáticos recauchutados.
- Las principales propiedades y comportamiento de los neumáticos, en especial de la resistencia a la rodadura y otras propiedades que tienen relación directa con ella.
- Los parámetros que influyen en la resistencia a la rodadura de los neumáticos nuevos y de los factores que pueden adicionalmente influir en la de los neumáticos recauchutados.
- Métodos de ensayo y análisis de la resistencia a la rodadura existentes. Hablaremos tanto de ensayo en banco como de los ensayos en pista normalizados, sin olvidarnos de los posibles algoritmos de implementación numérica como alternativas analíticas, y de otros ensayos no normalizados.
- Reglamentación o legislación asociada a los neumáticos y a la obtención del coeficiente de resistencia a la rodadura.

### Fase experimental

En la fase experimental, para poder alcanzar los objetivos parciales definidos antes, es conveniente independizar la influencia de los distintos parámetros a estudiar. Para lo que se plantea dos grupos de ensayo:

- Por un lado, ensayar neumáticos nuevos que luego se raspan y se recauchutan. Esto permitirá estudiar la diferencia de resistencia a la rodadura entre neumáticos nuevos y neumáticos recauchutados, así como la influencia de distintos compuestos de la banda de rodadura, sin que los resultados se vean influenciados por el estado de conservación de la carcasa.
- Por otro lado, ensayar neumáticos usados que luego se rasparan y se recauchutan usando el mismo proceso y materiales en todos ellos. Esto permitirá valorar la influencia del estado

de conservación de las carcadas utilizadas como punto de partida, eliminando la influencia de la banda de rodadura y el proceso empleado.

En ambos casos, se decide ensayar las carcadas raspadas antes de recauchutar, con el objetivo de valorar en cada caso la influencia relativa de la carcada y la banda de rodadura.

El estudio se realizará en dos líneas diferentes, una para turismo y otra para camión, debido a las diferencias entre sus dimensiones y prestaciones, así como en aplicación de los ensayos.

Dadas las limitaciones de los medios disponibles para el presente estudio, no es planteable analizar la influencia de utilizar distintas marcas y tipos de carcadas, ni tampoco las posibles diferencias en los parámetros utilizados por distintos fabricantes en el proceso de recauchutado; como por ejemplo, temperatura y tiempo de vulcanizado, diferencias en la geometría de raspado de la carcada, etc. Esto daría como resultado un tamaño de muestra muy elevado que rebasaría con creces las posibilidades de este estudio. Por tanto, en neumáticos de camión se plantea ensayar neumáticos de una misma medida y de un mismo fabricante, recauchutados por la misma empresa de recauchutado. En el caso de neumáticos de turismo, debido a su menor coste, sí que se plantea ensayar neumáticos de dos fabricantes, pero también de una misma medida.

### **Análisis de resultados y obtención de conclusiones**

Finalmente se realizará un análisis de los resultados y se obtendrán conclusiones de los mismos. En principio, se analizarán por separado los resultados de turismo y de camión, aunque se buscarán después coincidencias generales extrapolables a todos los tipos de neumáticos.



---

## Capítulo 2

### Estado del Arte





## 2.1. Estructura, composición y fabricación de los neumáticos nuevos

### 2.1.1. Generalidades del neumático

Un neumático es una cubierta de caucho con forma de toroide, llena de aire a presión, que suele ir montada sobre las llantas de las ruedas de algunos vehículos. Constituye la parte del vehículo que está en contacto con el suelo y sirve de elemento de interacción entre el vehículo y la carretera. Toda la fuerza entre el coche y la carretera se transmite a través del neumático, es ello, que está considerado como uno de los elementos de mayor importancia en un vehículo, e influye en toda la dinámica vehicular.

Algunas de las definiciones que nos van a acompañar a lo largo de este capítulo han sido extraídas de la reglamentación ([1][7][8][9][10][13]), así como de algunos autores relevantes, [14].

Las principales zonas en las que podemos dividir un neumático son la banda de rodadura, el flanco, el hombro, el talón y el revestimiento interior. Estas zonas, a su vez, pueden estar constituidas por diferentes partes o materiales, que más tarde describiremos en detalle para un neumático de estructura interna radial.

A continuación, con ayuda de la figura 2.1, describiremos las principales zonas de un neumático:

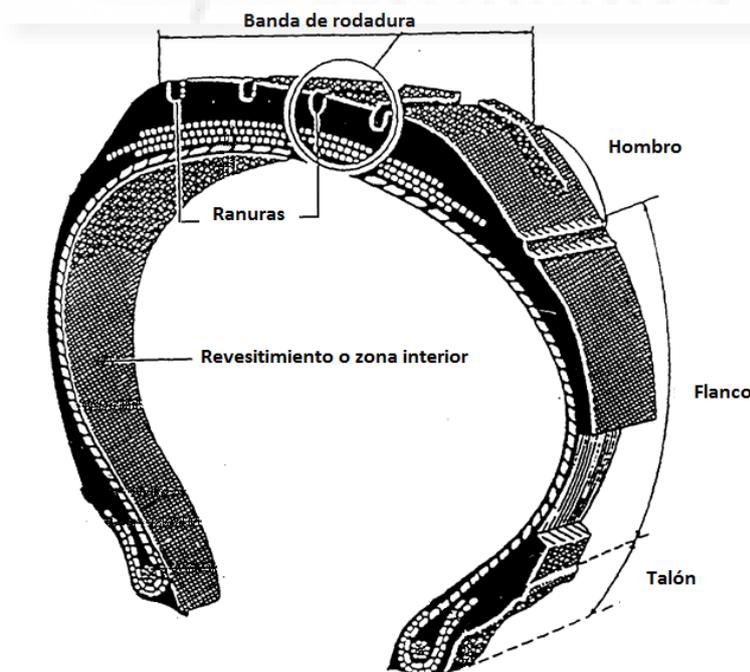


Figura 2.1: Principales zonas de un neumático

- **Banda de rodadura:** la parte del neumático concebida para entrar en contacto con el

suelo, proteger la carcasa contra el deterioro mecánico y contribuir a asegurar la adherencia al suelo. Puede llevar grabado un dibujo y unas ranuras que le ayudan a evacuar agua. El dibujo de la banda a su vez puede subdividirse en varias partes:

- **Ranuras o estriado:** el espacio entre dos nervaduras o dos tacos adyacentes del dibujo. Son las encargadas de evacuar el agua en situaciones de lluvia y calzada mojada.
  - **Tacos o parcelas:** son los materiales de caucho delimitado entre ranura y ranura, suelen conferir un patrón que se repite a lo largo del perímetro del neumático. Este puede ser liso o contener pequeñas ranuras o estrías.
  - **Ranuras principales:** son ranuras anchas circunferenciales situadas en la zona central de la banda de rodadura que, en el caso de los neumáticos para turismos y vehículos comerciales ligeros, llevan los indicadores de desgaste en la base. La profundidad de la banda de rodadura se suele medir en esta zona.
  - **Indicadores de desgaste:** son resaltes en el interior de las ranuras principales, concebidos para dar una indicación visual del grado de desgaste de la banda de rodadura. Forman parte del dibujo de la banda de rodadura.
  - **Hendiduras:** se tratan de pequeños cortes laterales realizados en la superficie, para mejorar la tracción y adherencia lateral.
- **Flanco:** es la parte del neumático situada entre la banda de rodadura y la zona diseñada para ser cubierta por la pestaña de la llanta. Son de goma flexible y resistente, lo que le permite soportar cargas alternas y proteger el neumático de daños laterales.
  - **Hombro:** es la zona de unión entre la banda de rodadura y el flanco. Es la parte que más se deforma, junto con la banda, debido al contacto con el suelo.
  - **Talón:** es la zona comprendida entre la parte que representa la anchura máxima del neumático y la zona diseñada para ser cubierta por la pestaña de la llanta.
  - **Revestimiento o zona interior:** la zona interior del neumático suele llevar un recubrimiento de forma que, en montaje de neumáticos con cámara, este estaba destinado a proteger la cámara; y en montaje sin cámara o TUBELESS, este será impermeable para asegurar la estanqueidad del neumático.

Las principales dimensiones que definen el neumático son: el ancho nominal de la sección, la relación nominal de aspecto y el diámetro nominal de la llanta. Estas medidas nominales son extraídas de tablas normalizadas de neumáticos como “*European Tyre and Rim Technical Organisation*” (ETRTO)[15] o “*The Tyre and Rim Association*” (TRA) [16], y no siempre

coinciden con la medida exacta del mismo. Aunque podemos hablar de muchas dimensiones asociadas a cada parte de un neumático, las que con más frecuencia vamos a tratar en este estudio se recogen a continuación y en la figura 2.2.

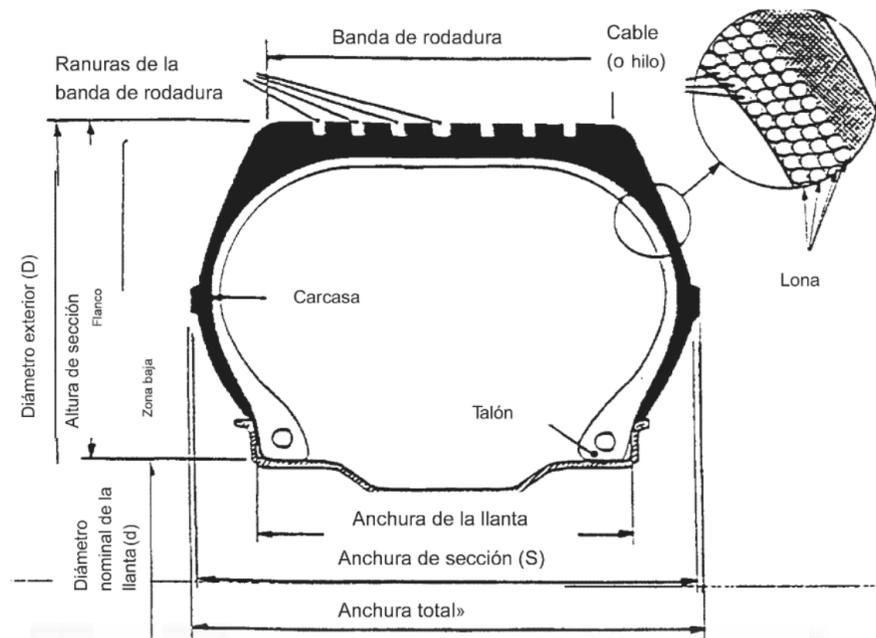


Figura 2.2: Principales dimensiones de un neumático

- **Anchura de sección:** es la distancia lineal entre el exterior de los flancos de un neumático inflado, cuando se adapta a la llanta especificada de medición, pero despreciando el relieve constituido por las inscripciones, las decoraciones, los cordones o las nervaduras de protección.
- **Anchura total:** es la distancia lineal entre el exterior de los flancos de un neumático inflado, una vez montado en la llanta especificada de medición, incluidas las inscripciones, las decoraciones, los cordones o las nervaduras de protección.
- **Altura de sección:** es la distancia igual, a la mitad de la diferencia, entre el diámetro exterior del neumático y el diámetro nominal de la llanta.
- **Relación nominal de aspecto:** se obtiene multiplicando por 100 la cifra obtenida de dividir la altura nominal de la sección por la anchura nominal de la sección, expresadas ambas en las mismas unidades.
- **Diámetro exterior:** es el diámetro total del neumático inflado.
- **Diámetro nominal de la llanta:** el diámetro de la llanta sobre la cual está previsto montar el neumático, medido en los apoyos de los talones.
- **Espesor de la banda:** es el espesor de goma de banda de rodadura que hay hasta la primera lona.

- **Espesor del flanco:** es el espesor de goma de flanco que hay hasta la primera lona.

La estructura interna de un neumático se puede clasificar, según diferentes autores [14], en función de las características técnicas o constructiva de dicha estructura. Siendo estas principalmente, estructura radial o diagonal, figura 2.3. Atendiendo a dicha clasificación se distinguen en particular los siguientes tipos de estructuras y/o neumáticos:

- **Diagonal:** hablamos de un neumático cuyos cables de la carcasa o estructura principal se extienden de talón a talón y están dispuestos de modo que, forman ángulos alternos en lonas sucesivas, inferiores a 90 grados respecto de la línea media de la banda de rodadura.
- **Diagonal cinturado:** se trata de un neumático de estructura diagonal, como el anterior, en el que la carcasa va zunchada mediante un cinturón formado por dos o más capas de cables rígidos, formando ángulos alternos, situados entre la banda de rodadura y la carcasa.
- **Radial:** es un neumático cuyos cables de la carcasa se extienden de talón a talón y están dispuestos de modo que, forman un ángulo sensiblemente igual a 90 grados respecto de la línea media de la banda de rodadura, cuya carcasa puede estar zunchada mediante un cinturón similar al del punto anterior y, que a su vez, puede estar estabilizada por otro cinturón circunferencial rígido, como última lona, previa a la banda de rodadura.
- **Reforzada o carga extra:** se trata de una estructura de neumático en la que la carcasa es más resistente que la del neumático normal correspondiente.

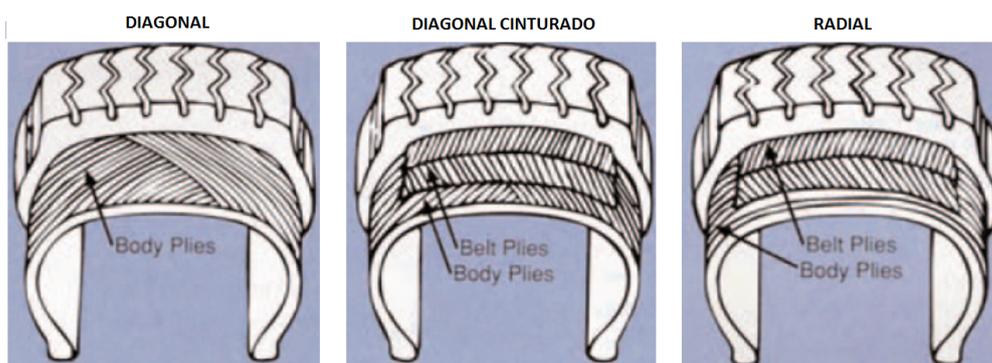


Figura 2.3: Principales estructuras de un neumático

Atendiendo a otros criterios que pueden estar relacionados con el uso final que se le puede dar, el Reglamento Europeo CE nº 661/2009, relativo a los requisitos de homologación de tipo referentes a la seguridad general de los vehículos de motor, sus remolques y sistemas, componentes y unidades técnicas independientes a ellos destinados, [1], en el apartado de definiciones clasifica los neumáticos por clases C1, C2 y C3, lo que podría equivaler a las gamas de neumáticos de turismo, camiones ligeros o camiones pesados. Según este criterio se definen y clasifican en particular de la siguiente manera:

- **Neumáticos de la clase C1:** son neumáticos diseñados principalmente para los vehículos de las categorías M1, N1, O1 y O2.
- **Neumáticos de la clase C2:** hablamos de neumáticos diseñados principalmente para los vehículos de las categorías M2, M3, N, O3 y O4 y que cuentan con un índice de capacidad de carga en utilización simple inferior o igual a 121 y un índice de velocidad superior o igual a N.
- **Neumáticos de la clase C3:** se trata de neumáticos destinados principalmente a los vehículos de las categorías M2, M3, N, O3 y O4 que cumplan con una de las condiciones siguientes: un índice de capacidad de carga en utilización simple superior o igual a 122, o bien, un índice de capacidad de carga en utilización simple inferior o igual a 121 y un código de velocidad inferior o igual a M.

Ya sea en diseño, fabricación o comercialización de neumáticos, existe una forma específica normalizada de designar los neumáticos. En este estudio, se atiende principalmente al tipo de designación normalizada comúnmente utilizado en el continente europeo y extraído de la reglamentación aplicable [7][8][9][10].

A continuación, se incluyen dos ejemplos de designación, uno de turismo y otro de camión, sobre los que comentaremos el significado de cada uno de sus grupos de cifras y/o letras:

185/65 R15 88H (ejemplo turismo – C1)

315/80 R22.5 154/150L (ejemplo camión pesado – C3)

- **Primer grupo de cifras:** 3 cifras numéricas que hacen referencia a la anchura nominal de la sección expresado en mm.
- **Segundo grupo de cifras:** 2 o 3 cifras numéricas que corresponden a la relación nominal de aspecto, expresado en tantos por cien.
- **Según letra (opcional):** esta letra indica el tipo de carcasa del neumático, que a su vez se puede identificar como:
  - **B:** Diagonal cinturado o bias belted.
  - **D o ausencia de letra:** Diagonal.
  - **R:** Radial.
- **Tercer grupo de cifras:** 1 o 2 cifras numéricas que indican el diámetro de la llanta en pulgadas.

- **Descripción de servicio:** grupo de 2 o 3 números y una letra que indican el índice de carga y el código de velocidad, respectivamente. Cuando el neumático tiene posibilidad de uso en montaje gemelo, se escribe el índice de carga para montaje simple seguido del índice de carga para montaje gemelo separados por una barra y a continuación, la letra que indica el código de velocidad.
- **Índice de carga o índice de capacidad de carga:** grupo de 2 o 3 números que indica la masa máxima que puede soportar el neumático cuando funciona con arreglo a los requisitos de uso especificados por el fabricante.
- **Código de velocidad o símbolo de categoría de velocidad:** código alfabético que indica la velocidad máxima que puede resistir un neumático.
- **Marcas adicionales:** grupos de letras o cifras numéricas, en ocasiones opcionales, que indican información adicional de servicio especial, presión de inflado, con cámara, sin cámara, homologación, entre otras:
  - **Prefijos IF o VF:** neumático de alta flexibilidad.
  - **Prefijos S o T:** neumático de uso temporal.
  - **Sufijo C:** neumáticos comerciales para camiones ligeros.
  - **Sufijo CP:** neumáticos comerciales para autocaravanas.
  - **EXTRA LOAD, XL, REINFORCED o REINF:** neumáticos que soportan mayor carga que el estándar.
  - **FRT:** neumático para eje de rodadura libre.
  - **M+S, MS, M&S, M-S, M.S. o M/S:** neumático especialmente diseñado para barro y nieve.
  - **REGROOVABLE:** neumáticos cuya banda se puede redibujar una vez gastada.
  - **TEMPORARY USE ONLY:** neumático de uso temporal.
  - **TUBELESS:** neumático sin cámara.
  - **PR o Ply Rating:** grupo de 3 o 4 cifras formado por las letras PR seguidas o precedidas de un valor numérico que indica el número de lonas cruzadas que posee la carcasa de un neumático.

### 2.1.2. Componentes de un neumático radial

Un neumático está formado principalmente de caucho y materiales que refuerzan su estructura. Al principio parece sencillo, pero según algunos autores [14], un neumático radial típico de turismo puede llegar a tener 20 o más componentes, 15 o más formulaciones de caucho y que estas a su vez, pueden estar formadas hasta por 60 materias primas diferentes. A continuación, con ayuda de la figura 2.4, se describen los principales componentes de un neumático radial, estructura más habitual en la actualidad, desde la capa interna hacia el exterior del mismo.

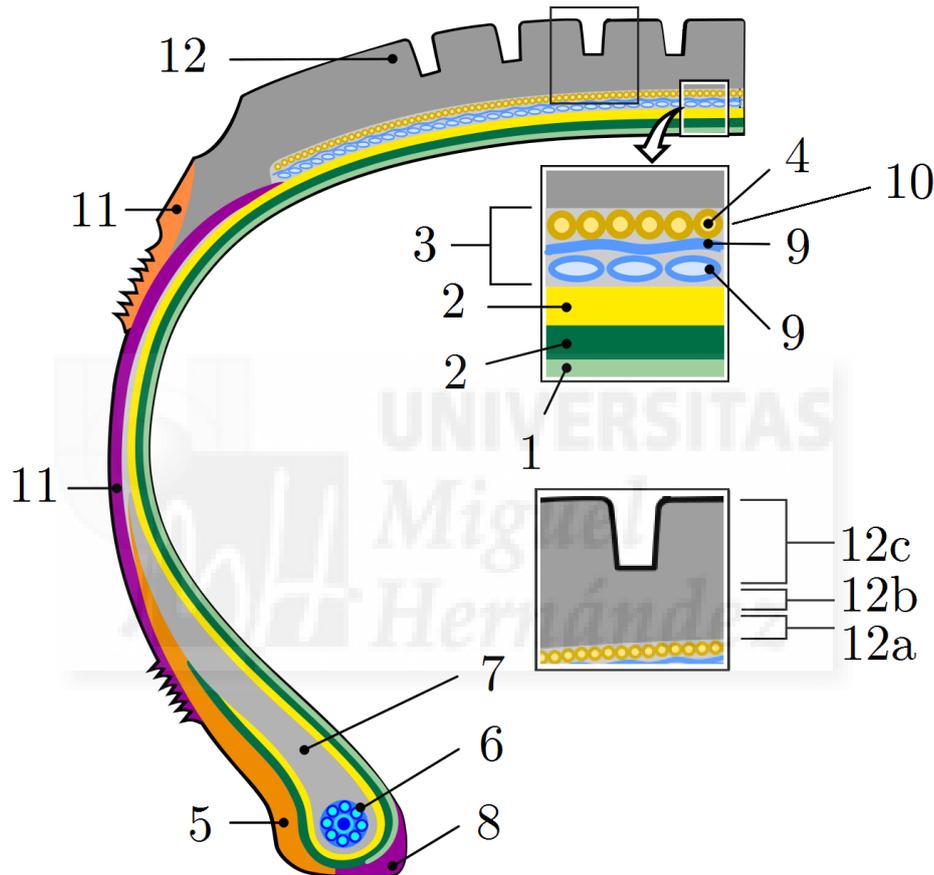


Figura 2.4: Principales partes de un neumático radial

1. **Capa butílica o revestimiento interno:** es una lámina impermeable de material sintético que evita que se escape el aire. Está fabricada de cauchos butílicos halógenos lo que la hace muy resistente al envejecimiento.
2. **Carcasa radial:** es la primera o primeras lonas del neumático con sus cordones o cables en disposición radial abrazada al aro de talón, lo que le ayuda a garantizar su sujeción. Esta construcción está diseñada para soportar las cargas radiales y constituye la principal estructura de un neumático radial. Estas capas pueden estar formada por lonas textiles o de acero.
3. **Lona:** es una capa constituida de cables o cordones recubiertos de caucho, dispuestos

paralelamente entre sí.

4. **Cordones o cables:** son los hilos que forman los tejidos de las lonas del neumático.
5. **Talón:** es el elemento del neumático cuya forma y estructura le permiten adaptarse a la llanta y mantener el neumático en la misma.
6. **Aro o alambre del talón:** es la estructura metálica de forma circular que le da rigidez a los talones y que ayuda a mantener el neumático sobre la llanta.
7. **Relleno de talón o gomas perfiladas:** se trata de unas piezas de caucho sobre las que asienta o embebe el aro del talón y ayudan a mantener el neumático sobre la llanta.
8. **Punta de talón o asiento de talón:** es el material de goma en forma de punta que ayuda a montar el talón sobre la llanta, haciéndolo hermético y protegiendo la carcasa contra el desgaste por la fricción o abrasión, provocada por movimientos relativos entre la llanta y el neumático.
9. **Cinturón:** designa una o más lonas subyacentes a la banda de rodadura y están orientadas sensiblemente en dirección de la línea media de esta última, a fin de conferir a la carcasa una brida circunferencial. Suele ser una lona confeccionada con cables.
10. **Falso cinturón de protección:** designa una lona intermedia optativa, situada entre la banda de rodadura y el cinturón, destinado a reducir al máximo el deterioro de este último. Suele ser una lona confeccionada con hilos textiles.
11. **Insertos:** se trata de bandas de goma internas, que pueden servir para conferir una forma específica al neumático, añadir propiedades flexibles a una zona concreta o añadir material en zonas donde, por desgaste por abrasión o por el comportamiento del neumático, tome especial interés tener mayor material o un material de diferentes propiedades.
12. **Banda de rodadura:** es la parte del neumático concebida para entrar en contacto con el pavimento o calzada, sirve para proteger la carcasa contra el deterioro mecánico, además de asegurar la adherencia al suelo del mismo. Puede llevar grabado un dibujo y unas ranuras que le ayudan a evacuar agua. Es la encargada de proporcionar el agarre o la fricción necesaria para la tracción, el frenado y el paso por curvas, y está especialmente formulada para proporcionar un equilibrio entre el desgaste, maniobrabilidad y resistencia a la rodadura. Esta banda a su vez puede estar formada por tres partes, de interior a exterior:
  - a) Una lámina de material o goma de unión. Es una capa opcional, que en algunos casos se utiliza para mejorar las características de cohesión entre la banda y la primera lona.

- b) Una capa o sub-banda interna de material de baja histéresis. Capa de caucho que, opcionalmente, se sitúa bajo la banda de rodadura, antes de la primera lona. Esta puede ser de un material y propiedades diferentes a la banda y tiene como misión, ajustar algunas de las propiedades finales del neumático, como puede ser la de mejorar la resistencia a la rodadura.
- c) La banda exterior con los dibujos y canales de evacuación de agua.

### 2.1.3. Fabricación de un neumático nuevo

Bajo su aspecto uniforme y simple, el neumático es un producto complejo, cuya fabricación requiere múltiples etapas. Según algunos fabricantes, algunos neumáticos pueden llegar a estar compuestos de más de 200 materias primas distintas, [17], una cifra muy genérica y superior a la mencionada anteriormente para neumáticos radiales de turismo. El conjunto de ellas, le confiere propiedades de elasticidad, resistencia al desgaste, adherencia y duración. A modo de esquema general, a continuación se muestra en la figura 2.5, un ejemplo del proceso Michelin, extraída de la web del fabricante, [18].

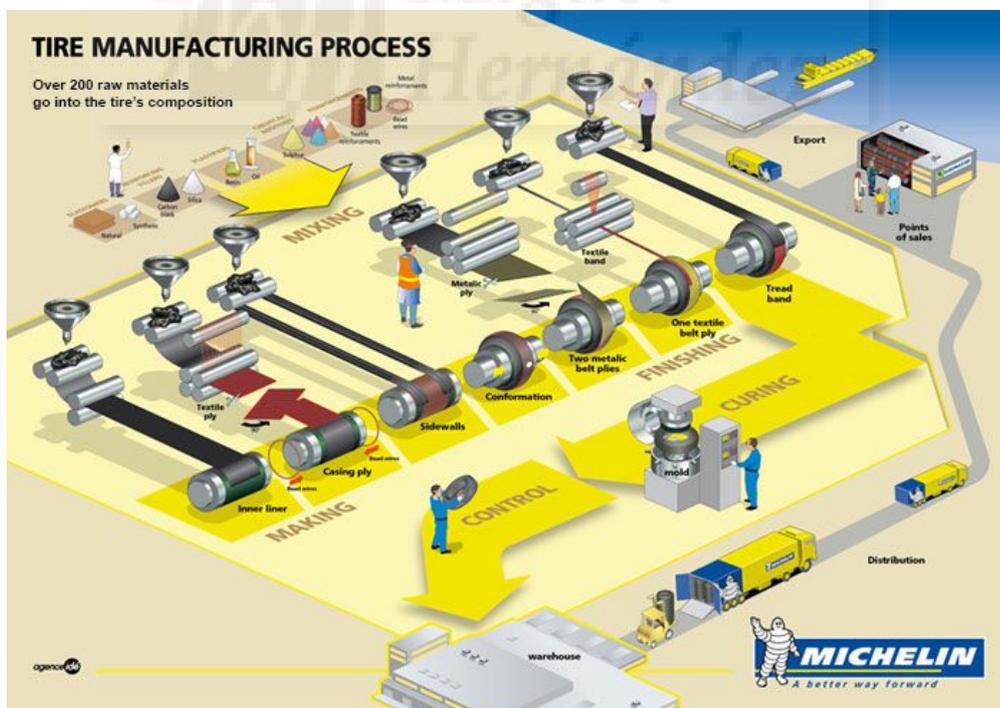


Figura 2.5: Proceso de fabricación de un neumático

A continuación, se resumirá la información extraída de las lecturas de algunos autores, [14][19], donde se describe cual es el proceso de fabricación de un neumático nuevo.

## Elaboración de las gomas

Un neumático puede contener entre 10 y 20 tipos distintos de gomas, incluso más. Cada una de ellas formuladas específicamente, para cada una de las partes que lo componen. A continuación, se exponen algunos de los componentes básicos con los que se fabrican las gomas:

- **Polímeros:** el caucho es un polímero amorfo de largas cadenas moleculares, muy flexibles y con interacciones entre éstas muy débiles. Es el principal componente del neumático, y este puede utilizarse en forma de caucho natural o caucho sintético, ya que cada uno aporta unas características que lo hacen más apropiado para una u otra parte del mismo. En su estado natural, tiene un comportamiento plástico, pero tras su vulcanizado con todos los ingredientes, se transforma en un polímero elástico. Dentro de los componentes que intervienen en la mezcla, el más representativo es el caucho. Su elevado módulo de elasticidad, le permite experimentar deformaciones altas ante esfuerzos relativamente pequeños, recuperando rápidamente su forma y dimensiones cuando cesa la fuerza deformante.
- **Ablandadores:** el aceite de petróleo, el alquitrán de pino, la resina y las ceras, son los materiales utilizados principalmente para ayudar y mejorar la adherencia y pegajosidad de los compuestos sin vulcanizar.
- **Antidegradantes:** las ceras, los antioxidantes y los antiozonantes, se suelen añadir a los compuestos de caucho para protegerlos del oxígeno, del ozono y del calor, proporcionándoles una capacidad para anular o mitigar el envejecimiento, lo que les confieren una mayor vida sin deteriorarse.
- **Curativos:** la combinación de azufre, aceleradores y activadores, es la encargada de ayudar durante la vulcanización o el curado del caucho, a que el polímero cambie su estructura interna, creando enlaces entre las cadenas poliméricas que lo transforman de un material viscoso a un denso material elástico.
- **Activadores:** su misión es activar a los acelerantes. Se usa el óxido de zinc y el ácido esteárico.
- **Retardadores:** se utilizan para disminuir la velocidad de vulcanización del caucho, y con ello, conseguir que se produzca una vulcanización más homogénea. Se usan en la fabricación de neumáticos de gran tamaño, donde interesa una vulcanización homogénea.
- **Rellenos o refuerzos del caucho:** Son los encargados de reforzar los cauchos utilizados. Los más comunes son el negro de humo, que le aporta resistencia al desgaste y la sílice, que además de resistencia proporciona baja resistencia a la rodadura.

Todos estos ingredientes, cuidadosamente formulados, se combinan en una mezcladora para

crear una goma de color negro que se corta en tiras y se enfría para ser almacenadas hasta la fase de construcción del neumático.

Hemos hablado de qué componentes se forman principalmente las gomas de un neumático; pero una goma puede llevar muchos más y, además, en ningún momento hemos hablado de cantidades. En la industria del neumático se tratan a las formulaciones de las gomas como una receta familiar antigua, que se pasa de mano en mano a los herederos legítimos. Recetas, que son guardadas y custodiadas como altos secretos industriales, para mantener la competencia tecnológica en el mercado.

### Elaboración de los materiales de refuerzo

Además de las gomas formadas principalmente de caucho, que constituyen la mayor parte del neumático, existen otro tipo de elementos que son los que en mayor medida soportan los esfuerzos que se generan en la estructura de un neumático. Proporcionan resistencia y estabilidad a la banda y flancos de un neumático, y se encargan de contener la presión de aire. A continuación, se exponen algunos de los componentes básicos con los que se fabrican los materiales de refuerzo:

- **Cordones de nilón:** son hilos sintéticos poliméricos de cadena larga producidos por polimerización continua o fusión de hilo. Se suelen utilizar en neumáticos radiales de turismo bajo la banda de rodadura para evitar deformaciones radiales debidas a los esfuerzos centrífugos.
- **Cordones de poliéster:** son, al igual que el predecesor, hilos sintéticos poliméricos de cadena larga producidos por polimerización continua o fusión de hilo. Se suelen utilizar en carcassas radiales y, en limitadas ocasiones, como cinturón.
- **Cordones de rayón:** se trata de hilos textiles de celulosa, producidos mediante hilado en mojado. Se suele usar como lona de carcassa o cinturón.
- **Cordones de aramida:** es una fibra orgánica sintética, producida por hilado con disolventes. Es dos o tres veces más fuerte que el poliéster y el nilón. Se puede utilizar para formar las lonas del cinturón, una alternativa a los cordones de acero para hacer el cinturón más ligero.
- **Cordones de acero:** son unos hilos de acero al carbono recubiertos de latón, que han sufrido un proceso de estirado y chapado. Posteriormente, se juntan varios de ellos y se retuercen enrollándose para formar un cable. Suele ser el material más utilizado en los cinturones de los neumáticos radiales de turismo.
- **Alambre o cable de acero:** son unos hilos de acero al carbono recubiertos de bronce

que han sufrido un proceso de trefilado y chapado posterior, que los hace muy resistentes. Se utilizan enrollados en forma de aros, una a cada lado del neumático, en diferentes configuraciones según su uso y sirven para anclar con firmeza el neumático inflado sobre la pestaña de la llanta.

### Construcción

Esta es la fase en la que el neumático se construye desde dentro hacia fuera. Es habitual el uso de un tambor rotatorio con parte central flexible, para ayudarnos a construir los neumáticos. Como ejemplo, podemos ver una imagen 2.6, extraída de una patente de una máquina para fabricar neumáticos, [20].

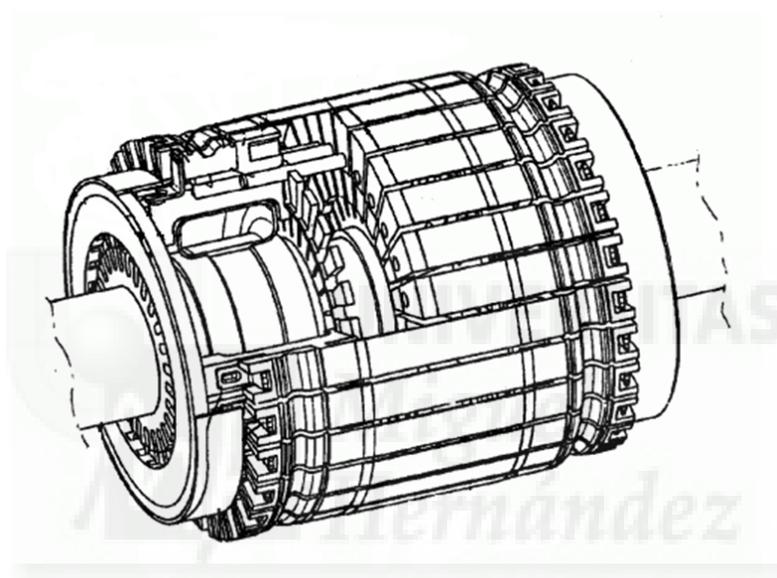


Figura 2.6: Tambor rotatorio para fabricar neumáticos

Todas las variantes de tambor y procesos de fabricación patentados parten de la misma idea, un cilindro rotatorio con parte central flexible que permite acercar los extremos en una parte del proceso de montaje de los elementos del neumático. A continuación, se detalla el proceso de confección del neumático en el tambor paso a paso, extraído de las lecturas realizadas en algunas páginas web de fabricantes [18] y algunos vídeo reportajes [21][22][23].

1. Se aplica sobre el rodillo la capa butílica o el forro interno.
2. A continuación, se añade la lona de cordones textiles que forma la carcasa radial principal. En ocasiones las carcasas radiales las conforman dos o más lonas.
3. Se añaden los rellenos de talón o gomas perfiladas sobre las que descansarán los aros.
4. Posteriormente, se superponen los aros de talón sobre los rellenos anterior montados.
5. Una vez llegados a este punto, con los primeros materiales correctamente alineados se

procederá al plegado de los extremos de la lámina de carcasa, abrazando y sujetando firmemente el aro de talón a la misma.

6. Seguidamente se añaden los posibles insertos en talón y hombros, así como los flancos, en su posición.
7. Con los principales elementos que forman la carcasa radial, pero colocados sobre la superficie cilíndrica del tambor, éste se contrae acercando los extremos hacia el centro, a la vez que se infla la parte central, confiriéndole una forma de toroide a la superficie cilíndrica inicial.
8. Una vez deformada la carcasa, se le aplican los cinturones de hilos metálicos oblicuos y de ángulos opuestos en la cima y exterior del toroide. Esta lona, junto con la de la carcasa, forman una red de triángulos que mantiene los esfuerzos y deformaciones del neumático dentro del orden esperado.
9. Opcionalmente, se pueden añadir otros insertos entre cinturones, normalmente en la zona de los hombros que ayudan a mantener un desgaste homogéneo en los neumáticos que tienden a gastarse antes en por esta zona.
10. Antes de finalizar, en neumáticos de turismo, se puede añadir opcionalmente una lona de hilos de nilón en disposición perimetral, que confiere una resistencia adicional a los esfuerzos centrífugos generados a altas velocidades.
11. Finalmente, se añade la banda de rodadura preformada, con alguna ranura de las principales, pero sin el dibujo final. El dibujo será añadido en el proceso de vulcanización.

El resultado de todos los procesos anteriores es un neumático de caucho en crudo, conocido también como “neumático verde” (sin vulcanizar), cuyo aspecto comienza a asemejarse al del producto final, pero que todavía necesita un procesado posterior.

### **Vulcanizado o curado**

El vulcanizado o curado de un neumático se suele realizar en una prensa tipo concha en la que se introducen normalmente dos moldes que tiene grabadas un reflejo de la geometría del neumático y el dibujo final de la banda. Estos semimoldes, a su vez, pueden estar divididos en varios segmentos de apertura en dirección radial, que permiten introducir el neumático en crudo y su posterior expulsión.

Una vez introducido el neumático verde entre los dos moldes, se cierra la prensa que hace hermético el conjunto, figura 2.7, [24]. A continuación, se hace pasar agua caliente o vapor sobrecalentado por el exterior del molde y a través de una vejiga interna de caucho que

se expande dentro del neumático. La fuerza de la vejiga que empuja el neumático desde el interior, hace que el neumático verde se conforme contra la superficie interior del molde. El calor se mantiene durante 15 minutos aproximadamente, depende de la fórmula de goma elegidas, provocando que el caucho cambie de estado plástico a un material más fuerte y elástico.

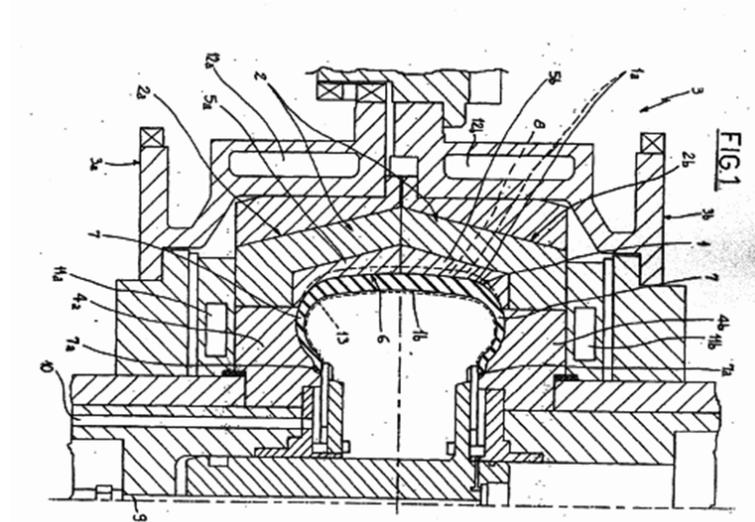


Figura 2.7: Prensa y molde de vulcanizado

### Acabado e inspección final

Finalmente, antes de almacenar el neumático, se recortan las rebabas procedentes de las juntas y los orificios de ventilación. A continuación, se realiza una inspección por una persona experta, con gran capacidad de detección visual de defectos y sensibilidad en las manos para detectar cambios de geometría irregulares. Si se detecta un defecto que no se puede reparar de manera sencilla, se desecha el neumático.

Existen otros métodos de inspección, habituales cuando tenemos implantados en la empresa un sistema de calidad total del producto, y que se realizan aleatoriamente durante la fabricación de los neumáticos. Se selecciona una muestra y se inspecciona en detalle para evaluar, por ejemplo, si existe cruce o rotura de cordones o cables, espacio entre cordones irregulares, espesor de los componentes, distribución correcta de los cinturones y aros de talón, ampollas en los flancos, poros y vacíos, entre otros.

Las pruebas de inspección pueden ser destructivas o no destructivas. La prueba destructiva más habitual es el corte de la muestra, donde se puede analizar con detalle la distribución de todos los componentes que forman el neumático. Pero las más usadas son las técnicas de inspección no destructivas, donde las más comunes son las pruebas de presión, la shearografía, los ultrasonidos, los rayos-X o inspección eléctrica por análisis de las corrientes de Foucault (detección de clavos).

## 2.2. Estructura, composición y fabricación de los neumáticos recauchutados

### 2.2.1. Generalidades del recauchutado



Figura 2.8: Vertedero de NFU

Recauchutar es una de las posibilidades para reciclar un neumático. Además de la detractora imagen que aporta un neumático abandonado en nuestra naturaleza, según Tratamiento Neumáticos Usados (TNU)[25], un neumático fuera de uso (NFU), puede tardar en degradarse 1000 años. El proceso de degradación de un neumático contamina el medio ambiente, ya que se transfiere en el proceso parte de los productos químicos al ecosistema, de este ecosistema se alimentan los animales y vegetales, y en el peor de los casos, formarán parte de nuestra cadena alimenticia. Por tanto, podemos estar pagando ya el precio de no tratar convenientemente este desecho. Por otro lado, los vertederos favorecen la proliferación de ratas, y el agua que se estanca en los neumáticos ayuda a que los mosquitos se reproduzcan fácilmente, convirtiéndose en dos principales fuentes de enfermedades.

Además, recauchutar ahorra energía. Según TNU[25], utilizando el litro de petróleo Brent como unidad de energía, se necesitan 23,5 litros para hacer un neumático de coche, 35 litros para un 4x4 y 141,5 litros para un neumático de camión. El material necesario para fabricar un neumático recauchutado puede ser entre un 30-50 % menos que uno nuevo. Según la Asociación Española de Neumáticos Reciclados (AER), solo en España, en 2015, se vendieron 807.850 neumáticos recauchutados, de los cuales 3/5 fueron unidades comerciales y 2/5 unidades de turismo, pero también todo terreno, maquinaria agrícola y neumáticos de aeronaves. Finalmente, según el análisis estadístico de “European Tyre and Rubber Manufacturers' Association” (ETRMA), figura 2.9[26], podemos ver que solo en neumáticos de

camión se recauchutaron en Europa 4.406.000 neumáticos en el mismo año.

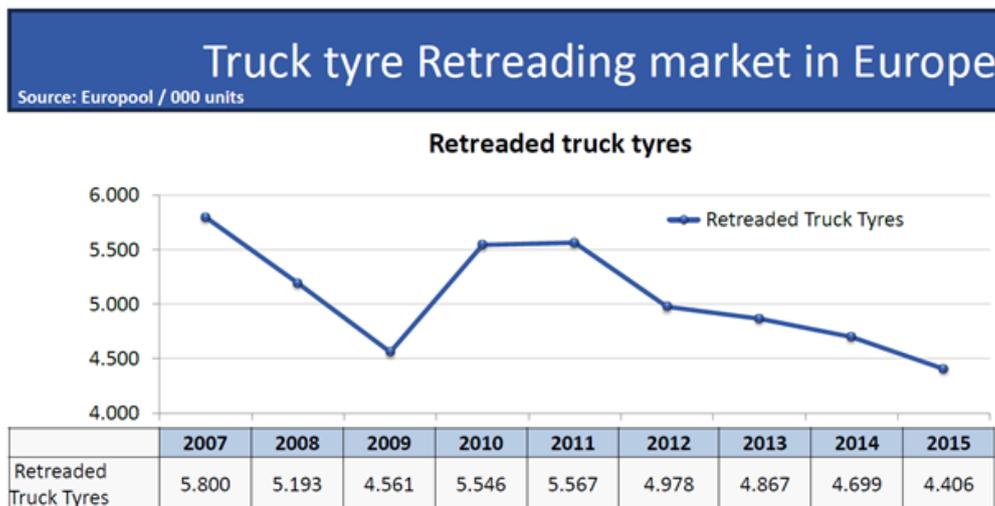


Figura 2.9: Mercado de recauchutados de camión ETRMA

En conclusión, y dentro de los protocolos de reciclado de materiales, la recogida y tratamiento de los NFU juega un papel imprescindible para un mantenimiento sostenible del planeta. A continuación, podemos ver un listado de la legislación nacional y europea asociada al reciclado de neumáticos, donde poder encontrar información de interés también relacionados con otros fines del NFU:

- Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Ley 11/2012, de 19 de diciembre, de medidas urgentes en materia de medio ambiente
- Acuerdo de Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015.
- Plan Estatal Marco De Gestión De Residuos 2016-2022.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.

### Principales componentes y partes de un neumático recauchutado

Igual que los neumáticos nuevos, un neumático recién recauchutado dispone de las mismas zonas, medidas y estructura interna. Se clasifican por las mismas clases y su designación normalizada es prácticamente idéntica salvo que, tiene que llevar una marca específica grabada en el flanco que debe hacer mención a que se trata de un neumático de fabricación por proceso de recauchutado (“RETREAD”). Una vez entendido que comparten la mayor de sus características, vamos a hacer mención a las partes específicas de un neumático recauchutado:

- **Cubierta:** el neumático usado antes de procesar, compuesto de la carcasa y de los restos del material de la banda de rodadura y del flanco. También conocido como NFU.
- **Carcasa:** neumático usado o cubierta, al que se le ha eliminado el material de la banda



Figura 2.10: Cubierta, carcasa y neumático recauchutado

de rodadura y, parcialmente, los flancos, en determinadas ocasiones.

- **Goma de unión:** capa o lamina de goma que se intercala entre la carcasa y la nueva banda de rodadura, solo en el recauchutado de camión, para garantizar la cohesión entre ellos tras el vulcanizado.
- **Banda de rodadura:** al igual que en un neumático nuevo, es la parte del neumático concebida para entrar en contacto con la calzada, proteger la carcasa contra el deterioro mecánico y contribuir a asegurar la adherencia al pavimento. La diferencia está en que esta banda se añade a la carcasa usada a través de uno de los métodos de recauchutado que se describen más adelante. Según el tipo de proceso utilizado, esta puede ser una banda precurada con las ranuras y los dibujos realizados, o se puede añadir en crudo al neumático y conferirle el dibujo y las ranuras en un procesado posterior.
- **Recubrimiento de flanco:** material que se añade sobre el flanco ligeramente raspado de la carcasa en el proceso de recauchutado en caliente, que le confiere un aspecto más estético, de conjunto y con todas las inscripciones nuevas.
- **Parches y reparaciones:** pequeños insertos o añadidos de material al neumático, para reparar pequeños daños permitidos por el procedimiento de recauchutado y que se han determinado como daños que no afectan a la integridad de la carcasa.

### 2.2.2. Fabricación de un neumático recauchutado

A continuación, se describirá los principales pasos para comprender el proceso de recauchutado de neumáticos usados fuera de uso (NFU), a partir de la información obtenida de diversas publicaciones [19][27], y aportada directamente por el fabricante de recauchutado.

El recauchutado es un proceso de reacondicionamiento de un neumático usado, mediante la sustitución de la banda de rodadura usada por una banda de material nuevo. Existen dos tipos básicos de recauchutado, tradicionalmente conocidos como recauchutado en frío y recauchutado en caliente.

La parte más importante en el proceso de recauchutado de neumáticos es hacer acopio de material. En Europa, particularmente en España, toda empresa dedicada al sector del neumático está obligada a llevar una gestión de residuos y con ella, a la retirada de los neumáticos por otra empresa especializada en el tratamiento de los NFU. Por otro lado, si un particular debe desechar un neumático, este tiene la obligación de llevarlo al punto limpio más cercano, vertedero de residuos controlado que gestiona cada ayuntamiento. Este a su vez tiene las mismas obligaciones que las empresas que desechan NFU y por tanto debe dar el mismo tratamiento al residuo. Podemos concluir que, de una u otra forma, todo NFU debe ser reciclado.



Figura 2.11: Llegada a planta de tratamiento de NFU

Una de las soluciones de reciclado es el recauchutado de NFU. A partir de ahora nos centraremos en seguir el proceso de reciclado por esta última línea.

Una vez en la planta de recauchutado o renovado, los NFU, se someten a una inspección inicial por un operario especializado, que verifica su antigüedad y estado, y que decidirá si el neumático es apto para recauchutar o, por lo contrario, debe llevar otro tratamiento. En este proceso el operario puede aceptar neumáticos con daños reparables, que deberá identificar

marcándolo sobre el neumático y/o sobre su hoja de ruta.

Una vez seleccionados los candidatos a renovar, se realiza una exhaustiva limpieza y segunda inspección, pero esta vez con técnicas de análisis no agresivo ni destructivo, como pruebas de presión, shearografía, ultrasonidos, rayos-X o inspección eléctrica (detección de clavos). Se trata de detectar fallos en las carcassas, tales como, rotura de las lonas o los cables, separación entre hilos o cables de una lona, separación entre lonas, pinchazos, cortes, óxido. A través de esta inspección, es otro operario especializado, quien decide si la carcassa es apta para recauchutar o es rechazada. En este proceso, al igual que el anterior, el operario puede aceptar neumáticos con daños en la carcassa reparables. Estos daños deberán estar identificados mediante una marca sobre el neumático y/o sobre su hoja de ruta.

Una vez seleccionados los neumáticos aptos para el proceso de recauchutado, estos son raspados hasta aproximadamente dos milímetros antes de las lonas de protección. Esta operación ayudará a la adhesión del nuevo caucho sobre la banda, dejando una textura rugosa que facilita su unión. Adicionalmente, en neumáticos destinados a recauchutar en caliente, se raspan ligeramente los flancos, eliminando los dibujos y marcados originales, procurando una textura idónea para ser cubierta de nuevo material. Se trata de conseguir una superficie pulida, uniforme y de textura y geometría adecuada para aceptar la nueva banda.

Para que este control de la superficie sea posible, hay que utilizar un torno con capacidad de inflado, y mecanizar parámetros como la apertura de talones, el radio de raspado, el radio de corona, el radio de hombro, el ancho de raspado, el ángulo de corte y el espesor de caucho remanente para llegar al primer cinturón. En muchas industrias esta operación está automatizada.

Una vez se ha raspado el neumático se realiza una tercera inspección para detectar posibles imperfecciones o daños, como hilos rotos u oxidados, pinchazos, pequeños cortes, etc.; daños que no afectan a la integridad de la estructura y que con pequeñas reparaciones se puede restablecer la resistencia de la misma. A continuación, para evitar fugas de aire y propagaciones de óxido tras el renovado, se raspan los hilos oxidados y se cortan los hilos rotos, se reparan los pinchazos y se rocía la carcassa con caucho natural diluido. Esta última capa, forma una película que ayudará a la adherencia del material de unión o de banda premoldeada y que favorecerá la polimerización en el proceso de horneado. Finalmente se rellenan los agujeros y cráteres con una mini extrusora de caucho, se aplana y se elimina el material sobrante, para adecuarse a la geometría del resto de la superficie.

Una vez acondicionada la carcassa, se procederá al recauchutado de la misma, proceso por el cual se le añade los elementos que le faltan, como son la banda de rodadura y en ocasiones los flancos, para conformar un neumático apto para la circulación. Existen dos procesos diferentes de realizar esta operación, recauchutado en frío o recauchutado en caliente, también mencionados en otras publicaciones como recauchutado común o recauchutado talón de talón.

## Recauchutado en frío

Con la carcasa ya acondicionada y con la superficie raspada, montaremos la misma en una máquina embandadora, que es capaz de sujetarla por sus dos aros interiores, hacerla estanca e inflarla a la presión ideal de trabajo.

A continuación, se añade una capa o lámina de goma de unión y una banda de rodadura premoldeada con el nuevo dibujo. Esta banda puede cubrir, además, los hombros y parte del flanco. Se debe llevar especial cuidado en la alineación de la banda y, en su caso, la unión de sus extremos. Cuando la banda se debe unir en sus extremos, se añade una lámina de material de unión para ayudar a la cohesión entre ellos.

Seguidamente, un sistema de compactación neumático o hidráulico a través de unos brazos que disponen de unos rodillos, fijan y compactan la banda contra la carcasa y entre los extremos de la banda, en su caso. Todavía hoy podemos encontrar pequeños talleres de recauchutado en frío, donde estas operaciones se realicen a mano.

Finalmente, se introduce en un horno autoclave, aproximadamente, a una temperatura ente 98-125 °C, una presión entre 12 y 24 bar, y durante 180-240 min. En este horno es donde se produce la vulcanización de los materiales, lo que garantiza la cohesión de la banda con la carcasa.

El proceso de recauchutado en frío se caracteriza por permitir mayor rapidez de fabricación y variedad en la elección el dibujo. En su contra el neumático no presenta un aspecto nuevo en su conjunto ya que mantiene el dibujo y marcado original en los flancos.

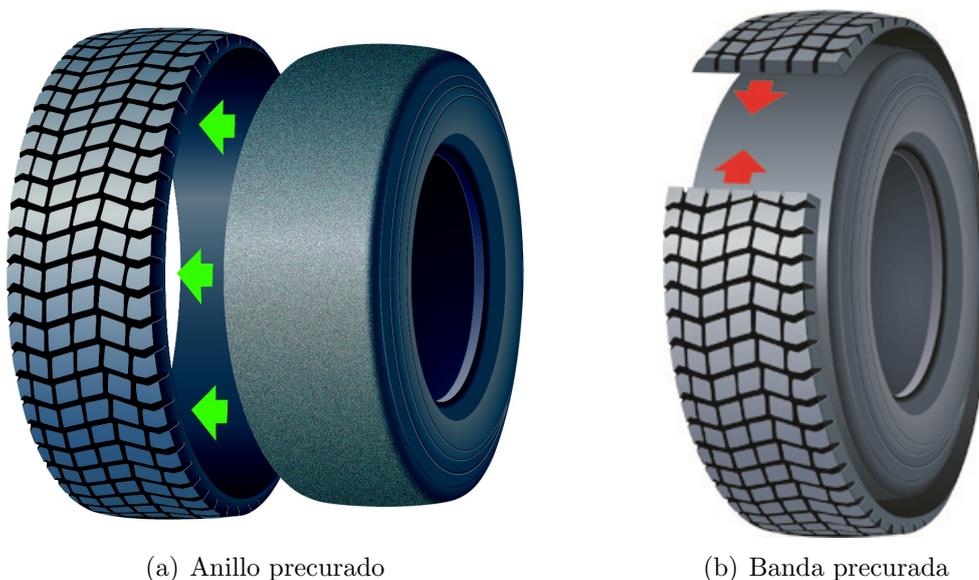


Figura 2.12: Recauchutado en frío

### Recauchutado en caliente

Tras haber preparado la carcasa, un recauchutado en caliente requiere de varias capas de goma “cruda” en la zona de la banda y en la zona del flanco, tantas como el diseño final lo requiera.

Un operario, ayudado de una máquina, alinea y añade el material sobre la carcasa, en la longitud y cantidad necesaria para crear el diseño de la banda de rodadura. En muchas ocasiones, estas máquinas se pueden programar para controlar la alineación y la cantidad de material a añadir.

Finalmente, en un proceso similar al curado de neumáticos nuevos, el conjunto se coloca dentro de unos moldes con el perfil y el dibujo definitivo, y se introduce en un horno de vulcanización tipo prensa, donde se mantiene la temperatura en un orden de 150-170 °C, entre aproximadamente 60-120 min y a una presión de unos 16 bar. Esta operación garantiza la cohesión del material añadido con la carcasa y una vulcanización homogénea.

Esta técnica se caracteriza por permitir medidas de neumáticos idénticos sea cual sea la carcasa de origen, lo que garantiza un desgaste más uniforme. Permite además un aspecto comparable a un neumático nuevo con dibujo y marcajes nuevos, lo que origina un mejor aspecto montado en el vehículo.

En su contra, está la dificultad de mantener un catálogo de dibujos amplio, ya que mantener y fabricar los moldes para prensas tiene un elevado coste y, en ocasiones, ligera variación en los dibujos supone la realización de moldes nuevos. Supone un hándicap a tener en cuenta si se desea tener una gran cobertura de mercado.



Figura 2.13: Recauchutado en caliente

## 2.3. Resistencia a la rodadura

### 2.3.1. Introducción

La resistencia a la rodadura es un campo extensamente estudiado por los principales fabricantes de neumáticos, que entienden que este parámetro es fundamental para bajar el consumo de combustible y disminuir la contaminación del medio ambiente. Podemos encontrar gran cantidad de bibliografía relacionada [14][28][29][30][31][29], que nos ayuda a comprender y entender todos los factores asociados a las pérdidas debidas a la resistencia a la rodadura, y como esto afecta al consumo de combustible de un vehículo.

Para poder comparar entre distintos neumáticos con distintos códigos de velocidad e índices de carga es habitual el uso del Coeficiente de Resistencia a la Rodadura (CRR), definido como la relación entre la Fuerza Resistente a la Rodadura (FRR), expresado en newton, y la carga soportada por el neumático ( $L_m$ ), expresado en kilo-newton.

$$CRR = \frac{FRR}{L_m} \quad (2.1)$$

### 2.3.2. Histéresis

El caucho es un material viscoelástico capaz de absorber energía al deformarse y devolver parte de esa energía al recuperar su estado inicial.

Durante este ciclo, un material ideal sin comportamiento viscoso sería capaz de devolver toda la energía que ha absorbido al desaparecer el esfuerzo que le había producido la deformación, pero esto no sucede realmente. El caucho, durante este ciclo, pierde parte de la energía principalmente en forma de calor, debido en parte al mecanismo de fricción entre las partículas de los materiales que los componen. Esta pérdida de energía en cada ciclo carga-descarga, se denomina histéresis. La figura 2.14a, representa un ciclo de histéresis.

Este efecto es comparable con el grado de rebote que posee un material. Si nosotros dejamos caer desde una altura de un metro una bola de golf sobre una superficie rígida, por ejemplo, una plancha metálica, esta rebotará hasta prácticamente la misma altura; por lo que, podríamos decir que la plancha tiene un alto grado de rebote, lo que sería equivalente a una baja histéresis. Si, por el contrario, dejamos caer esta misma bola sobre una tarima de caucho, habitual en los parques para niños, esta rebotaría una cuarta parte de la altura inicial o incluso menos. Por tanto, en este último caso, el caucho tendrá un bajo grado de rebote o una elevada histéresis. Podemos concluir, que la superficie de caucho, debido a las propiedades de ese material, absorbe más energía que la superficie metálica. Por otro lado, hemos visto que el grado de rebote es contrario al grado de histéresis, son conceptos opuestos.

De acuerdo con ello, una prueba habitual para determinar la histéresis del caucho es la resistencia por rebote; en este sentido la norma UNE-ISO 4662:2013 [32] establece los principios y métodos de cálculo.

La histéresis en un neumático, surge de la rotación bajo carga del mismo, sobre una superficie firme, donde se produce un ciclo de flexo-compresión a la entrada del contacto neumático-suelo, y se revierte a la salida, combinado con una compresión y cizallamiento durante el contacto, ver figura 2.14b[30]. Además, también se dan fenómenos de histéresis entre la superficie de la carretera y la banda del neumático, básicamente producidas por la adaptación de la goma de la banda de rodadura a la macro y micro rugosidad de la superficie.

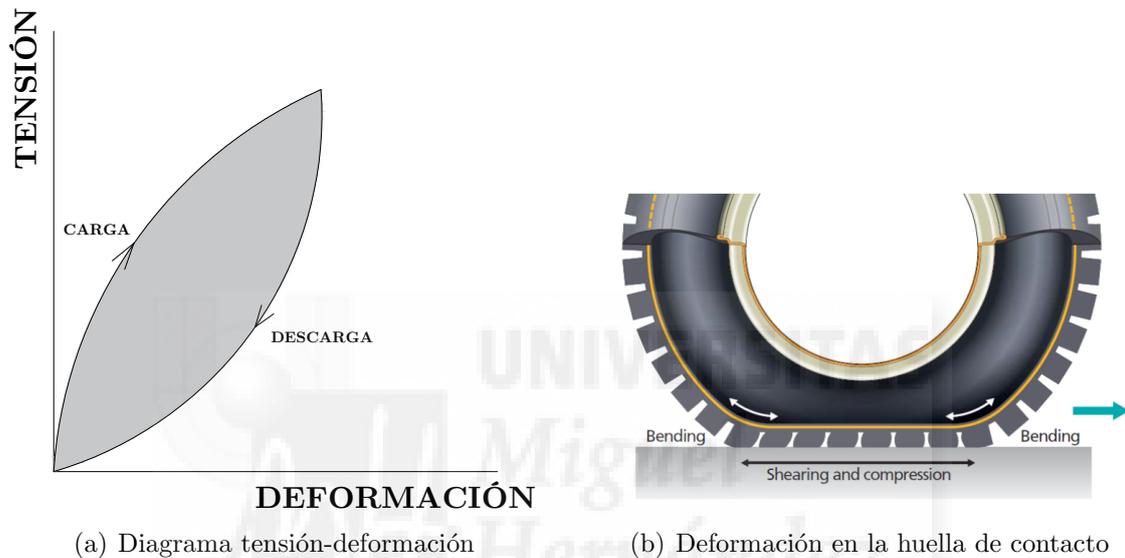


Figura 2.14: Mecanismo de histéresis

### 2.3.3. Mecanismo de fricción

Podemos diferenciar entre tres principales tipos de fricción generadas en la superficie de contacto del neumático con la calzada: adhesión, deformación y abrasión. Estas pueden producirse de forma independiente o como una composición de las tres, tal y como refleja la figura 2.15, en la que podemos ver los tres tipos de fricción: Adhesión, deformación y abrasión.

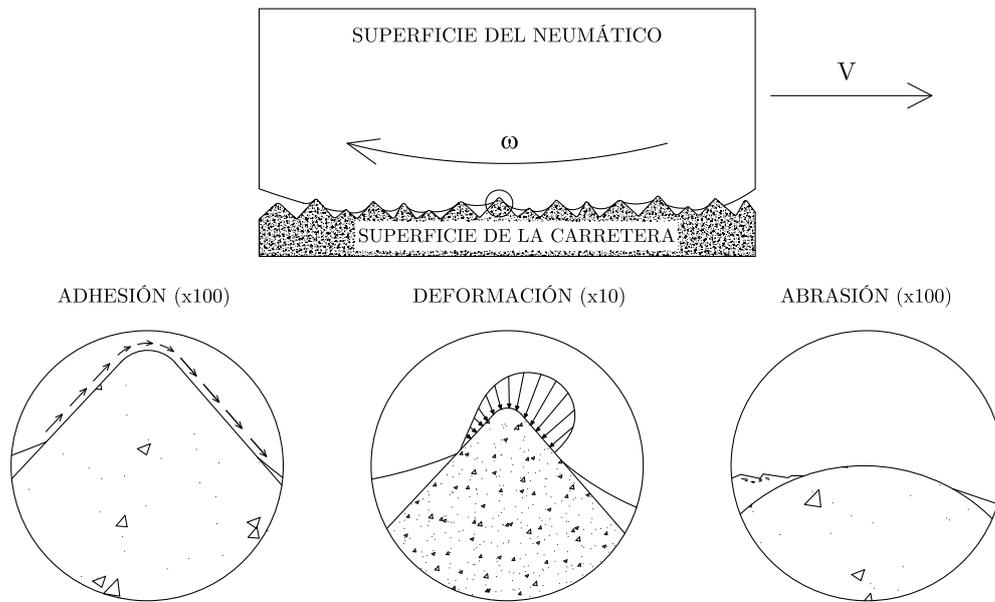


Figura 2.15: Tipos de fricción

### Adhesión

La adhesión es un fenómeno que aparece al poner en contacto la goma y el asfalto. Se basa en el principio de atracción electrostática entre dos cuerpos, donde aparecen una serie de relaciones intermoleculares que tienden a atraerse. Esta relación es mayor cuanto mayor es la superficie de contacto; es por ello que cuanto más lisa y limpia sean las superficies en contacto, mayor capacidad de adhesión.

Este fenómeno puede ayudar a que haya mayor o menor fricción en la superficie de contacto, y que se produzcan mayores fuerzas que se resistan al movimiento lineal o rotacional y por tanto afectar al CRR. Pero por el orden de magnitud de los esfuerzos y las características del mismo, tienen mayor influencia en otras características como en adherencia lateral, en tracción o en frenado.

### Deformación

Las deformaciones que aparecen en la superficie de contacto son debidas a que el caucho es un material viscoelástico que se adapta a las irregularidades del terreno, tendiendo a rellenar los huecos de dichas irregularidades. Al entrar material en estos huecos, se produce una fricción mecánica que cuando el neumático está en movimiento, ya sea rotación o traslación, deforma el caucho para adaptarlo a la forma de dichos huecos. El caucho al tener estas propiedades viscoelásticas, tiende a concentrar material a la entrada de la rugosidad, produciendo una mayor presión que a la salida. Esto es debido a que la velocidad de recuperación de su estado original es menor que la velocidad con la que se deforma. Por ello, dependiendo del sentido de movimiento del neumático, la distribución de esfuerzos en el contacto con una rugosidad, resulta una fuerza que se encuentra adelantada al punto medio de la cresta de la rugosidad

y con una componente tangencial que se opone al giro y traslación del neumático.

Esta fuerza contribuye en mayor medida que la anterior a la resistencia a la rodadura del neumático y por tanto al CRR. Pero como en el caso anterior, también es un elemento fundamental en la fricción del neumático para tracción y frenado, y de mayor importancia en superficie mojada. Esto es debido a que la adherencia en una superficie mojada carece de mecanismo de adhesión, debido a las partículas de agua que se intercalan en la superficie de contacto y por tanto, solo se dispone de la fricción mecánica.

Por otro lado, se produce una pérdida de energía que se suma al efecto puramente mecánico descrito, debido a la histéresis del caucho. En cada giro del neumático esta deformación se suma a la histéresis producido por la propia deformación del talón, flanco, hombros y banda. No obstante, cabe destacar que la frecuencia con la que sucede el ciclo de histéresis debido a la rugosidad de la superficie en contacto con la calzada, rondan los  $10^5 - 10^6$  Hz. Este orden es mucho mayor que los 10-100 Hz del efecto de histéresis por la flexión y deflexión debido a la rodadura del neumático.

### **Abrasión**

La abrasión surge cuando dos cuerpos se deslizan uno contra el otro en una situación de contacto. Como producto del agarre mecánico anterior, y un agotamiento del límite de rotura del material en la zona de contacto, se producen unos micro desgarros en el caucho de la superficie del neumático. A medida que se le va dando uso al neumático, estos desgarros van reduciendo la vida útil del mismo y su efecto puede apreciarse en el desgaste de la banda de rodadura, reduciendo el espesor de material de la misma.

La fuerza necesaria para producir estos arrancamientos o desgarros, es la que sumada a las dos anteriores pueden oponerse al movimiento de un neumático. Aunque en este caso, la principal consecuencia es el agotamiento de la vida útil del neumático, sí que es cierto que, a medida que se produce dicho agotamiento, se ven afectadas el resto de propiedades.

### **2.3.4. Explicación dinámica de la resistencia a la rodadura**

Desde un punto de vista dinámico, la resistencia a la rodadura es un par de fuerzas que se oponen al movimiento rotacional del neumático.

Resumiendo lo que expone Aparicio[28], los esfuerzos que se producen en la superficie de contacto entre la superficie y el neumático durante un movimiento bajo carga, hacen que se produzca una deformación radial considerable. La zona de contacto dibujada en el suelo, se conoce como huella de contacto. La distribución de presiones en la huella de contacto tiene una forma asimétrica respecto al eje  $y$ , lo que hace que el centro de presiones de la fuerza

resultante de esta distribución quede ligeramente adelantada a la dirección del movimiento. Esta fuerza multiplicada por la distancia al eje y ( $e$ ), es lo que se conoce como momento resistente a la rodadura. Figura 2.16.

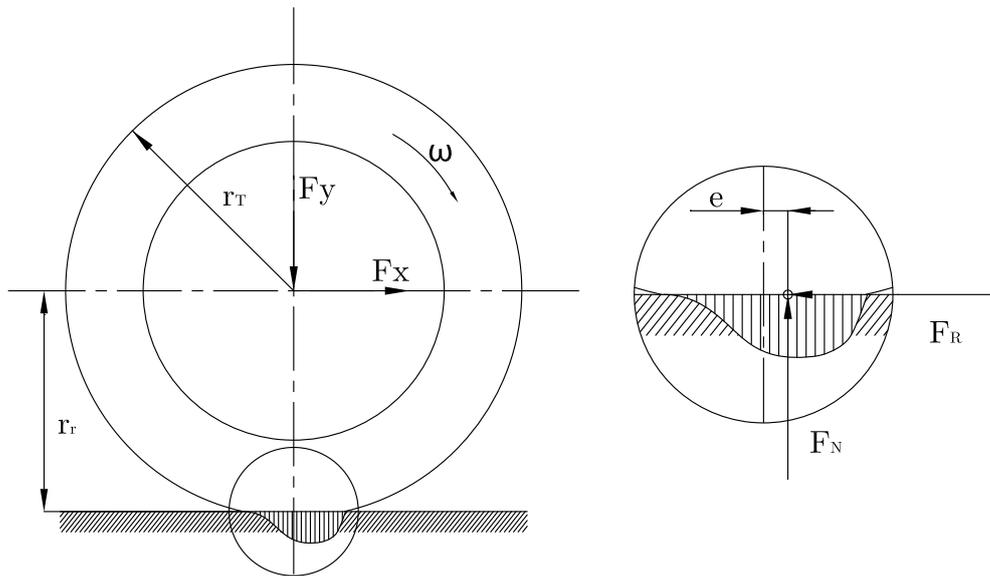


Figura 2.16: Diagrama de solido libre de un neumático

Desde el punto de vista de una rodadura libre, haría falta aplicar una fuerza longitudinal en el eje para darle movimiento al neumático. Esta condición implica la existencia de una fuerza igual y contraria, aplicada en la zona de contacto que lo haga girar. Esta fuerza resultante, es conocida como resistencia a la rodadura, y la relación entre esta fuerza y la carga aplicada, es el CRR.

Esta es la principal causa de la resistencia a la rodadura, y está provocada por la histéresis del material de la carcasa, banda y hombros que se deforman en cada vuelta del neumático a su paso por la huella de contacto.

Pero la resistencia a la rodadura está relacionada con una pérdida de potencia, que se debe además a los siguientes factores: pérdidas por histéresis en el interior de la estructura del neumático, fricciones locales en la huella, fricción con el aire interior y exterior, fricción entre llanta y talón del neumático.

### 2.3.5. Punto de vista termodinámico

Desde el punto de vista del Primer Principio de la Termodinámica, ecuación (2.2), en sistemas cerrados, el trabajo necesario para poder variar la de energía de un sistema que evoluciona de un estado inicial a otro estado final, conlleva una transferencia de calor hacia o desde el sistema.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} \quad (2.2)$$

Donde,

$\frac{dE}{dt}$ , es la variación de energía del sistema.

$\dot{Q}$ , es el flujo de calor intercambiado por el sistema.

$\dot{W}$ , es el flujo de trabajo intercambiado por el sistema a sus alrededores.

Análogamente, podemos decir que el trabajo necesario para variar la energía interna de una rueda que se desea trasladar rodando de un lugar a otro, conllevará una generación de calor que se disipará al entorno que lo rodea. La expresión en términos energéticos nos ayuda a comprender que la resistencia a la rodadura no es más que una pérdida de energía. Si consideramos un sistema estable, pero permitimos cambios transitorios de temperatura y variaciones de velocidad, la formulación cambia para pasar a incorporar estos términos, ecuación (2.3).

Si consideramos un equilibrio térmico del sistema en movimiento o un movimiento a velocidad constante, podemos definir la resistencia a la rodadura directamente en términos de cambio de energía térmica o en términos de variación de la energía cinética del sistema, pudiendo reescribir la ecuación (2.3) de la forma (2.4) o (2.5).

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dE_c}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} \quad (2.3)$$

$$FRR = \left( \dot{W} - \frac{dE_c}{dt} \right) / v \quad (2.4)$$

$$FRR = \left( \frac{dU}{dt} - \dot{Q} \right) / v \quad (2.5)$$

Donde,

FRR, es la fuerza resistente a la rodadura.

$\frac{dU}{dt}$ , es la variación de energía interna del sistema.

$\frac{dE_c}{dt}$ , es la variación de energía cinética del sistema.

$v$ , es la velocidad de traslación.

Como hemos visto antes, la mayor parte de estas pérdidas se disipan por histéresis mecánica de los materiales que conforman el neumático. Pero existen otras pérdidas que pueden asociarse a la resistencia a la rodadura, sobre todo si queremos analizar un sistema real o

aproximado. Estas pueden distinguirse entre pérdidas debidas a la fricción aerodinámica, pérdidas por fricción con el pavimento, pérdidas en los rodamiento y pérdidas por fricción en el contacto neumático llanta. En resumen, todas ellas son, por tanto, pérdidas de energía asociadas a la rodadura, que se convierten en calor y que se disipan hacia el interior y/o exterior del neumático.

### 2.3.6. Relación entre la resistencia a la rodadura y otras propiedades

Existen una gran lista de propiedades asociadas a las características finales que se espera de un neumático. Cuando analizamos varias en conjunto, es habitual encontrar gráficos tipo tela de araña como los que podemos ver en las figuras 2.17 y 2.18, [33]. Muchas de ellas se pueden desarrollar de manera independiente, pero hay algunas de ellas que dependen unas de otras, lo que exige llegar a una solución de compromiso, donde al final las propiedades más destacadas serán las que marquen el uso específico final de un neumático. Aunque es más habitual marcar los objetivos de diseño en mejorar las propiedades que exige el sector del mercado al que queremos dirigir nuestro producto. Por ejemplo, existe un sector de la población que se está concienciando con el ahorro de combustible o CO<sub>2</sub>, pero no quieren dejar de lado la seguridad o el precio del producto. Si a esto le sumamos las exigencias gubernamentales en materia de seguridad y reducción emisiones, se vislumbra un sector del mercado con exigencias en esta dirección. Por tanto, un neumático que quiera cumplir con las expectativas de este sector, deberá desarrollarse para reducir el consumo, las emisiones sonoras y mejorar la adherencia, así como aumentar o mantener la durabilidad y un coste razonable.

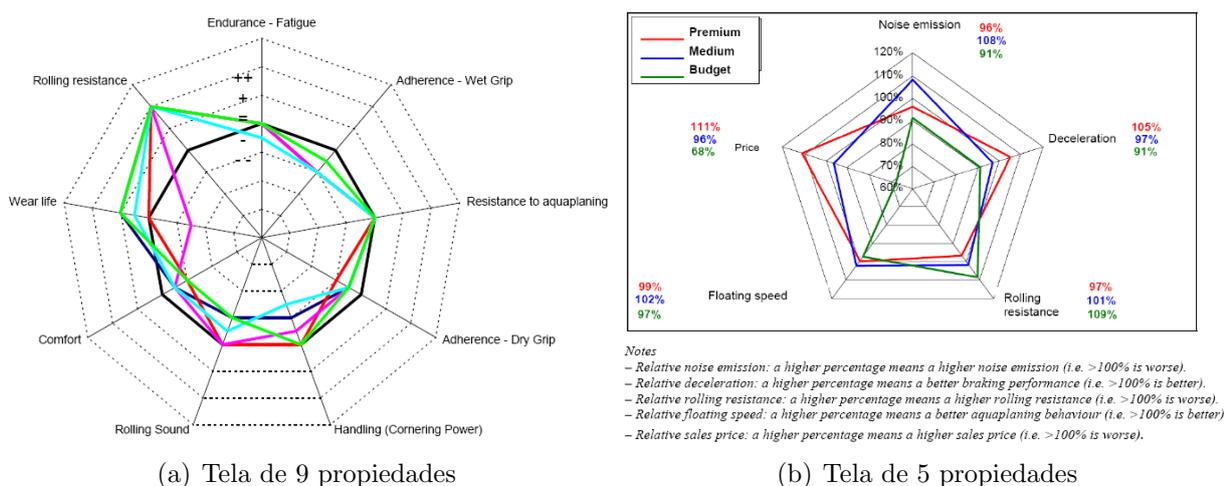


Figura 2.17: Gráficos en forma de tela de araña

En la misma línea, algunos autores [33] comentan que, aunque se puede encontrar en otras literaturas que cualquiera de estas propiedades puede ser reducida o mejorada significativamente mediante el uso de tecnologías avanzadas y nuevos materiales, esto suele incrementar

los costes de fabricación y muchas de ellas están patentadas, no siendo posible explotar su utilización. Como consecuencia, cada fabricante tiene neumáticos con diferentes propiedades, cada uno con unas prestaciones enfocadas a un uso en concreto, por ejemplo, mayor tracción y adherencia, en contra de una mayor resistencia a la rodadura, mayor desgaste o mayor coste. Es por tanto, el consumidor final, quien decide ante la gran variedad de neumáticos con propiedades y características diferentes. Y en el caso de consumidores desinformados, podrían tratar de seleccionar neumáticos con baja resistencia a la rodadura, pero mala tracción. Es por esto, que la regulación de los gobiernos es fundamental, para mantener la seguridad de los neumáticos y avanzar en el desarrollo tecnológico hacia la búsqueda de un neumático que mejore algunas de sus características, pero que mantenga unos mínimos que le proporcionen la seguridad necesaria para la circulación.

Como vemos en la figura 2.18[33], es habitual reducir estos gráficos tipo tela de araña a tres propiedades principales. Este triángulo tiene en cada vértice una propiedad: la resistencia a la rodadura, la resistencia al desgaste y la adherencia en mojado, también es conocido en el sector como “triángulo mágico”. Además de ser tres propiedades que en conjunto proporcionan una conducción más equilibrada y segura, las exigencias gubernamentales, como el reciente etiquetado de neumáticos en la Unión Europea[34] (que añade exigencias de ruido de rodadura), o las regulaciones comparables en Estados Unido, Japón y otros lugares, han sido clave para obligar a los fabricantes a buscar soluciones. Es habitual tener grandes problemas cuando tratamos de maximizar una de las propiedades del triángulo, ya que algunos autores [35] han observado un empeoramiento en alguna o el resto de las propiedades. Por tanto, variaciones o mejoras en la resistencia a la rodadura deberán contrastarse con el no empeoramiento del resto de propiedades, debiendo encontrar una solución de compromiso que permita mantener los mínimos exigidos por la reglamentación vigente.

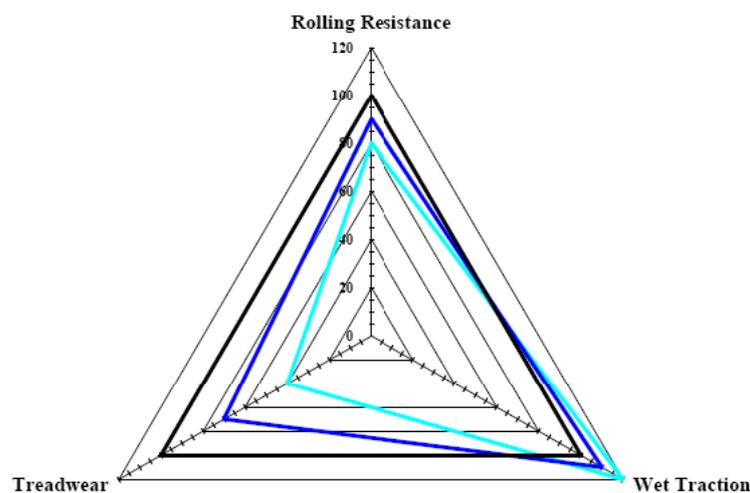


Figura 2.18: Triángulo mágico

### 2.3.7. Relación entre las propiedades del neumático y la tangente de delta

A lo largo de la historia, las características de un neumático han sido estudiadas en base a la composición de los materiales que lo componen. En este estudio no se pretende profundizar en exceso en el desarrollo que el caucho ha sufrido con el paso del tiempo, ni cuales han sido todos los avances o técnicas de caracterización de este material. Sin embargo, se ha considerado importante hacer mención a la  $\text{tg } \delta$ , también llamado factor de pérdidas, y como esta se tiene en cuenta a la hora de diseñar nuevos cauchos pensando en las propiedades finales que obtendrá una vez ensamblado y curado en un neumático.

La  $\text{tg } \delta$  es parámetro utilizado para estimar el comportamiento viscoelástico del caucho de la banda de rodadura y se define como la relación entre el módulo de pérdidas (también conocido como modulo viscoso) y el módulo elástico. Las pérdidas por histéresis a bajas frecuencias producidas por la deformación de la banda de rodadura en cada vuelta, están más relacionadas con el modulo elástico del material, y las de alta frecuencia producidas por la fricción con la calzada están más relacionadas con el modulo viscoso. Por lo general, a mayor  $\text{tg } \delta$ , las pérdidas por histéresis también son mayores. Por el contrario, cuanto menor sea esta, menores serán las pérdidas por histéresis.

Tomamos como ejemplo de situaciones habituales en un neumático en circulación, la marcha a velocidad constante y el frenado en una superficie húmeda. La marcha a velocidad constante produce una deformación del flanco del neumático, que dependerá de la velocidad y perímetro del mismo, rondando un valor medio de uno 20 Hz para un turismo a 100 km/h. El frenado en superficie mojada, implica una deformación de alta frecuencia, causada por fricción con las rugosidades de la superficie de la carretera, cuya frecuencia se ha estimado en el orden de  $100.000 \div 1.000.000$  Hz. Para la circulación a velocidad constante, nos interesa que la  $\text{tg } \delta$  sea baja, ya que así las pérdidas por histéresis serán menores y mejoraremos la resistencia a la rodadura (parámetro de consumo de combustible asociado al vehículo). Para una situación de frenado en superficie mojada, lo que nos interesa es que las pérdidas por histéresis sean lo mayor posible, ya que aumentará de esta forma el coeficiente de fricción necesario para frenar.

Debido a esto, en el diseño de la formula apropiada del caucho de un neumático, como vemos en la figura 2.19, es habitual analizar el comportamiento de la  $\text{tg } \delta$  en un rango de frecuencias que cubra ambas situaciones. El objetivo que se persigue es un valor de  $\text{tg } \delta$  bajo en el rango de frecuencias bajas, correspondientes a la resistencia a la rodadura y un valor de  $\text{tg } \delta$  alto en rangos de frecuencia altas, correspondiente al deslizamiento en superficie mojada.

Experimentalmente es complicado llegar a frecuencias de ensayo de  $100.000 \div 1.000.000$  Hz, por lo que se han desarrollado otros métodos para medir la  $\text{tg } \delta$  del caucho de la banda de manera indirecta, y estimar a partir de ella propiedades: como la abrasión, la adherencia

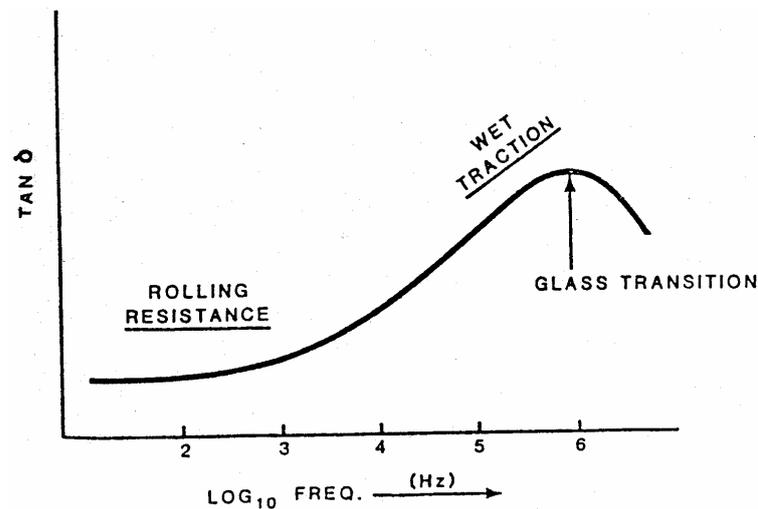


Figura 2.19: Relación entre la tangente de delta y la frecuencia

en mojado o la resistencia a la rodadura. Los métodos reológicos de medición indirecta de la  $\tan \delta$  se basan en el principio de correspondencia tiempo-temperatura: en este sentido, una exploración de los módulos elástico y viscoso con temperaturas desde  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mediante un estímulo de esfuerzo constante, puede dibujar la curva de  $\tan \delta$  del caucho vulcanizado en la que se pueden correlacionar las condiciones de uso final antes mencionadas, siendo las altas temperaturas equivalentes a las bajas frecuencias y viceversa. En este sentido, la figura 2.20 [36], muestra la curva que dibuja la  $\tan \delta$  frente a la temperatura, donde se indica que la frecuencia es contraria a la dirección de la temperatura, y se marcan las zonas de frecuencia o temperaturas propias de algunas propiedades del neumático relacionadas con esta.

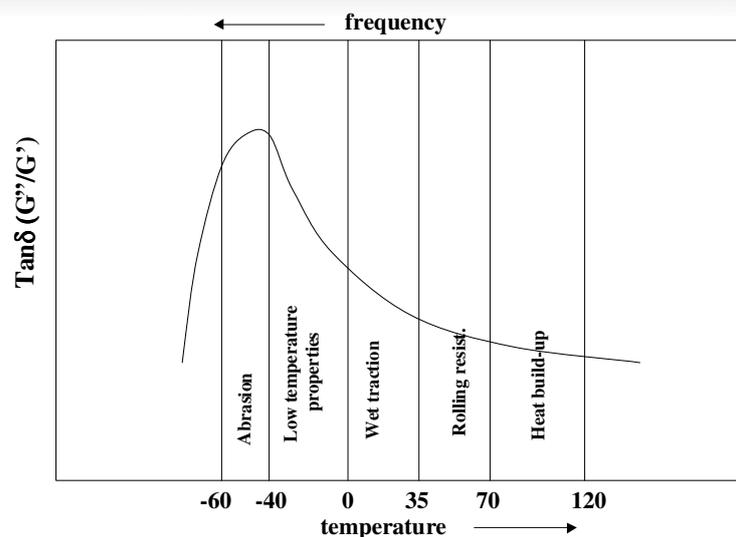


Figura 2.20: Curva tangente delta y temperatura

En la figura 2.21, se muestra el resultado real de un ensayo por temperatura para la obtención de la  $\tan \delta$  (rojo), realizado mediante un método de análisis mecánico dinámico (DMA). El módulo de almacenamiento  $E'$  (azul) es la componente elástica, y el módulo  $E''$  (verde), corresponde a la componente viscosa. El muestreo está realizado en incrementos de  $2^{\circ}\text{C}$  y el

estímulo del ensayo es una deformación por compresión constante con una frecuencia de 5 Hz.

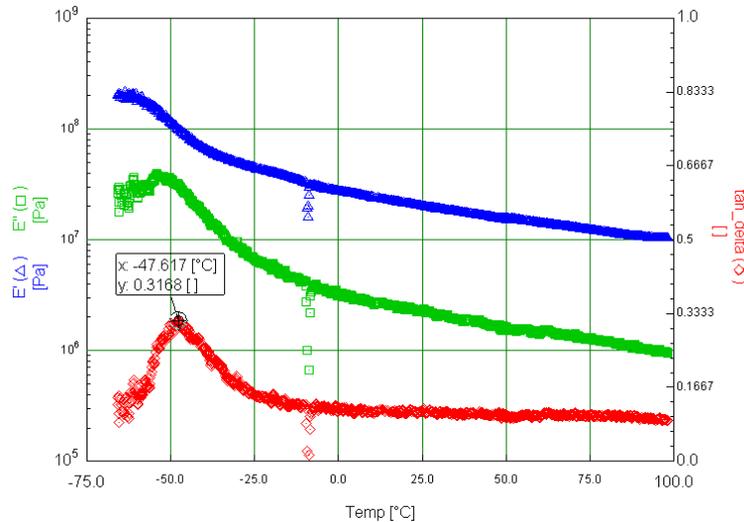


Figura 2.21: Ensayo tangente de delta

### 2.3.8. Nuevos materiales

En la actualidad, existen grandes avances que incorporan refuerzos de sílice al negro de humo en la formulación de las gomas, [37], que junto con técnicas de dispersión y agrupación de partículas de refuerzo, y que junto con aditivos o tratamientos que modifican el comportamiento de la superficie de dichas partículas, son capaces de reducir el desgaste y la resistencia a la rodadura, sin perder propiedades de adherencia. Recientemente se está estudiando la inclusión de nanopartículas además del negro de carbono y la sílice, como rellenos en la cadena de polímeros, en la formulación de las gomas, [38]. Las nanopartículas que han demostrado mayor potencial en las mejoras de las propiedades del triángulo son los nanotubos de carbono, las de grafeno y las arcillas. Las nanopartículas de arcilla se utilizan en pequeñas proporciones junto al negro de carbón, para reducir las pérdidas por histéresis a altas temperaturas y mantener la resistencia o la dureza. Las nanopartículas de grafeno, también en pequeñas proporciones, aportan una dureza mayor que la cantidad necesaria de negro de carbón para el mismo efecto, además de ayudar a reducir las pérdidas por histéresis. Y los nanotubos de carbono tienen las mismas propiedades que el grafeno, pero funcionan mejor en algunas situaciones. En ambos casos, tienen buena conductividad eléctrica y térmica y sirven como componente de refuerzo del caucho. En conclusión, la clave parece estar en combinar cuidadosamente estas nanopartículas con los habituales componentes de refuerzo de la estructura polimérica, los aditivos ya conocidos y ocasionalmente algún tratamiento superficial, para maximizar la resistencia a la rodadura y al desgaste, manteniendo una buena adherencia.

## 2.4. Factores que influyen en la resistencia a la rodadura de neumáticos nuevos

### 2.4.1. Factores asociados a los neumáticos nuevos

#### Temperatura interna y temperatura ambiente

La temperatura interna de un neumático en uso, puede variar dependiendo de la temperatura ambiente, el tipo de conducción, la carga que soporte, la calzada o el tipo de neumático, entre otras. La temperatura interna de un neumático de turismo puede estar entre 20-90°C, [14], y la de un neumático de camión pesado entre 20-110°C, [39]. Teniendo en cuenta que la temperatura ambiente puede variar en un rango medio de 20°C, de invierno a verano, o de un país a otro, es habitual encontrarnos con temperaturas que oscilan de -20°C hasta 40°C. Normalmente, a mayor temperatura ambiente, mayor temperatura interna.

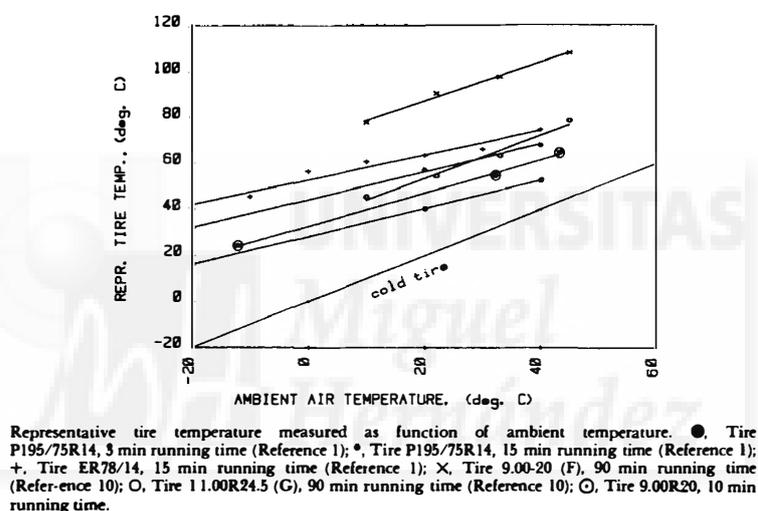


Figura 2.22: Curva de temperatura interna y temperatura ambiente

Estas variaciones de temperatura, afectan al CRR. Se ha demostrado en varias ocasiones, que una variación de 1°C de temperatura ambiente puede producir una variación en el CRR entre el 0,4-0,8 %, e incluso mayores variaciones, [39]. Esta afirmación fue publicada, también, por Michelin[30], para un neumático de turismo y venía a decir:

*”La variación en la resistencia a la rodadura en función de la temperatura ambiente no es lineal. Sin embargo, entre 10°C y 40°C, una variación de 1°C de temperatura ambiente se corresponde con una variación en el CRR de 0,6 %.”*

El CRR es inversamente proporcional a la temperatura ambiente, que varía, a su vez, de la misma forma con la temperatura interna del neumático. Es decir, un aumento de la temperatura interna del neumático corresponde a una disminución del CRR. Esto sucede por dos principales causas; la primera de ellas, es por el cambio de las propiedades viscoelásticas del caucho con la temperatura y la segunda, que un aumento de la temperatura interna del neumático con la válvula cerrada, supone un aumento de la presión interna del neumático,

esta hace que aumente la rigidez del neumático y se reduzcan las deformaciones y por tanto, la energía disipada. El caucho, además, varía sus propiedades en función de su temperatura, por tanto, el CRR también se ve afectado por la temperatura que alcanza el propio neumático.

Debido a esto, normas como la ISO 28580:2009[40], proponen un factor de corrección de la fuerza de resistencia a la rodadura en función de la temperatura ambiente, ecuación 2.6. En este caso, para una temperatura ambiente de referencia, de 25°C.

$$FRR_{25} = FRR [1 + K (t_{amb} - 25)] \quad (2.6)$$

Donde,

$FRR_{25}$ , es la fuerza resistente a la rodadura a temperatura 25°C, en N.

$FRR$ , es la fuerza resistente a la rodadura, en N.

$K$ , es una constante de temperatura, en 1/°C:

0,008 para neumáticos de clase C1

0,010 para neumáticos de clase C2

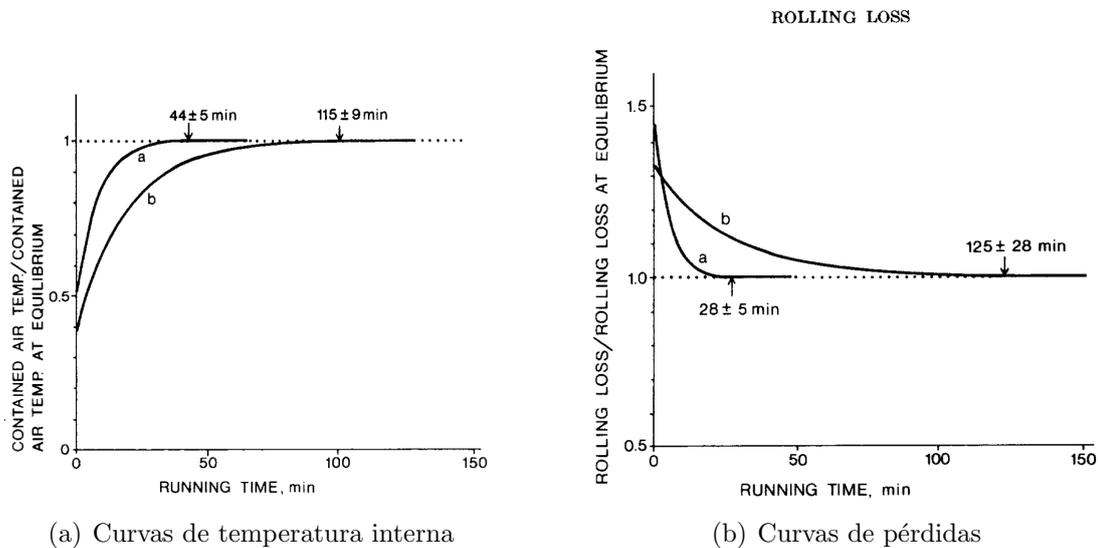
0,006 para neumáticos de clase C3

$t_{amb}$ , es la temperatura ambiente, en °C.

En el informe final de la primera parte del proyecto MIRIAM [4], se analiza la importancia de este factor y se demuestran algunas inconsistencias entre otros estudios publicados, que demuestran grandes diferencias en la resistencia a la rodadura, al variar la temperatura de trabajo; y concluye, que para evitar imprecisiones altas, se debe procurar ensayar a temperaturas ambiente próximas a la temperatura de referencia.

Otro detalle relacionado con la temperatura interna del neumático y la necesidad de tener controlada dicha temperatura, es que al haberse demostrado la correlación anterior, surge la necesidad de estabilizar dicha temperatura antes de tomar la medida del CRR. Debido a este fenómeno, Schuring [41] publicó, que aunque las pérdidas por rodadura responden casi de manera instantánea a los cambios de presión, carga y velocidad, los cambios en la temperatura interna del neumático y la temperatura del caucho del neumático tienen una respuesta más lenta. Concluyendo, que para un neumático de turismo ensayado a su carga de diseño, con una presión inicial de 165 kPa, rodando a 80 km/h, el CRR se estabiliza alrededor de los 30 minutos de empezar el ensayo, mientras que, para un neumático de camión, con una carga de 16,7 kN, presión inicial de 535 kPa y 90 km/h, puede tardar en llegar al equilibrio alrededor de 150 minutos.

Se sugiere por tanto, y en base a los resultados que podemos ver en la figura 2.23 [41], realizar un calentamiento del neumático, cuya duración dependerá de la carga, la velocidad y el tipo de neumático.



La curva “a” pertenece a un neumático de turismo, mientras que la “b” a un neumático de camión.

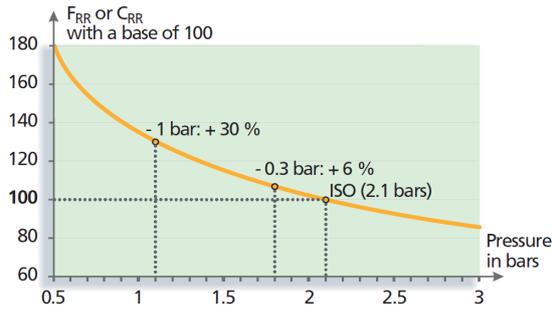
Figura 2.23: Temperatura y pérdidas durante el calentamiento

En esta misma línea, la norma ISO 28580:2009 [40], regula dicha etapa de calentamiento en el apartado 7.4, proponiendo 4 duraciones distintas de calentamiento, diferenciando entre neumáticos de turismo, camión y autobús, por índices de carga o diámetro de llanta.

### Presión de inflado

Observando la figura 2.24 [30], podemos ver como la resistencia a la rodadura se ve incrementada, de manera directa, con la disminución de la presión. Al producirse una pérdida de presión en un neumático, se produce una mayor huella de contacto, lo que produce mayores esfuerzos de compresión, flexión y cortadura sobre las partículas de caucho en contacto con el pavimento. Este efecto, en un ciclo de rodadura habitual de un neumático, produce un aumento de calor por histéresis del material, lo que se traduce en un incremento del CRR.

### Passenger car tyres



### Truck tyres

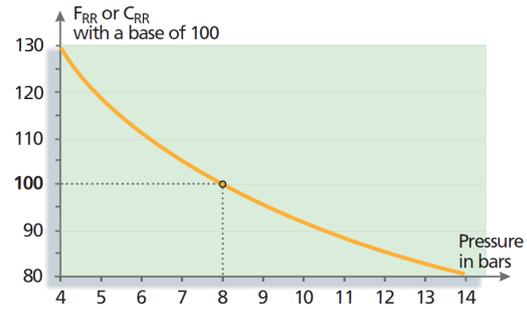
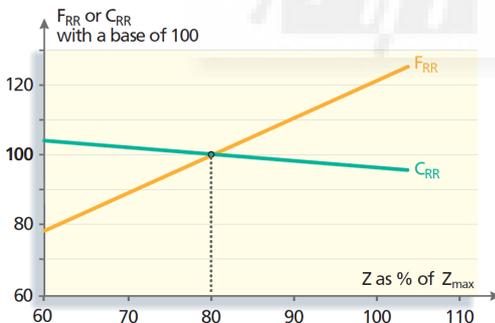


Figura 2.24: Variación del CRR con la presión

## Capacidad de carga

El efecto que produce la carga normal que soporta un neumático en rodadura, es similar a la circulación con presiones bajas. Como vemos en la figura 2.25 [30], al aumentar la carga soportada por un neumático, se aumenta la resistencia a la rodadura. Esto sucede, porque se produce una mayor deformación del neumático, aumentando la huella de contacto y los esfuerzos que se producen en el mismo. Igual que en el párrafo anterior, se aumenta el calor por histéresis del material, lo que produce incremento de la resistencia a la rodadura. Por el contrario, como el CRR es función de la carga normal y de la resistencia a la rodadura, este coeficiente disminuye.

### Passenger car tyres



### Truck tyres

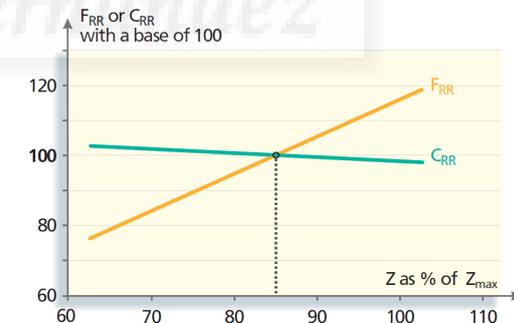


Figura 2.25: Variación del CRR con la capacidad de carga

## Velocidad longitudinal

La resistencia a la rodadura de un neumático también varía en función de la velocidad, esta relación no es lineal, si no que representa una relación exponencial. Por ejemplo, en la figura 2.26 [30], podemos ver como, en un neumático de turismo el CRR aumenta significativamente a partir de los 100 km/h. Son los conocidos como efectos por alta velocidad, y se pueden interpretar fácilmente si expresamos la Primera Ley de la Termodinámicas en estos términos.

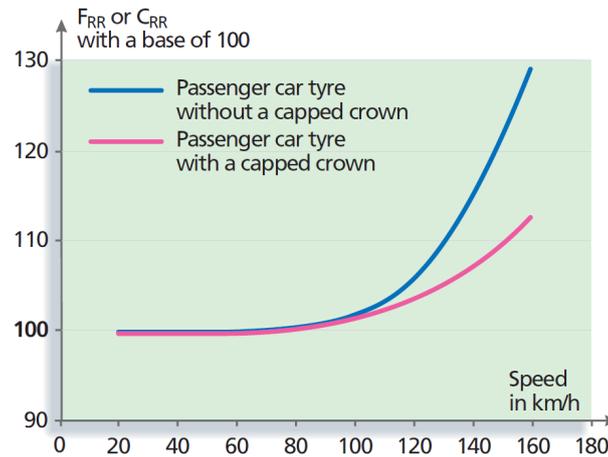


Figura 2.26: Variación del CRR con la velocidad

Según algunos autores [14], el calor que se transfiere desde el neumático al medio ambiente y la velocidad de transferencia de calor, se hace cada vez más significativa, a medida que aumenta la temperatura del neumático. Esto da lugar, a una reducción en el incremento de la energía interna del neumático. Después de un cierto período de tiempo, la temperatura del neumático aumenta hasta un punto, en el que la velocidad de transferencia de calor se equilibra y se produce una condición de estado estacionario, donde la resistencia a la rodadura, para ese estado de carga y velocidad, son constantes. En este punto, la variación de la energía interna se convierte en cero y existe un equilibrio térmico entre el neumático y su entorno. Esta es la condición descrita como "térmicamente estabilizada".

Por lo tanto, bajo las condiciones descritas anteriormente, la variación de energía debida a la resistencia a la rodadura, contribuye inicialmente y en su mayor parte, a un aumento de la energía interna del neumático (cuando no hay transferencia de calor desde el neumático y se utiliza casi toda la energía para calentar internamente el neumático) y después cambia su dirección, de manera que, toda esta energía se elimina hacia el entorno mediante transferencia de calor, lo que se traduce en un aumento del CRR.

### Dimensiones del neumático

Si todos los neumáticos fueran geoméricamente parecidos, fabricados con los mismos materiales, así como puestos en funcionamiento en el mismo estado de carga, presión, temperatura y velocidad, la resistencia a la rodadura solo dependería del diámetro exterior del neumático, [41]. Como esto, obviamente no es así, las variaciones en las dimensiones principales de un neumático, también son un factor que puede aumentar o disminuir el CRR.

Es difícil obtener una relación clara con el CRR solo teniendo en cuenta las dimensiones del neumático, ya que influyen otros muchos parámetros, que hacen que el fabricante tenga la necesidad de adaptar la estructura interna y los materiales del neumático; y por tanto, en raras ocasiones encontraremos neumáticos que varían una o dos dimensiones conservando

el resto, sin cambiar su estructura, y por tanto, el mecanismo de histéresis. Schuring[41], hace una discusión extensa, donde analiza la variación del ancho de llanta, de la relación de aspecto, del tamaño del neumático o de la geometría de la banda, cuyos resultados, son muy variados.

El parámetro que parece tener una relación más afín con el CRR, es el diámetro exterior. Para un mismo tipo de construcción y materiales, Pillai y Fielding-Russell[42], encontraron una relación proporcional, entre la resistencia a la rodadura y el diámetro exterior, para predecir el efecto de la relación de aspecto combinando con el resto de dimensiones del neumático, ecuación (2.7). Para un diámetro exterior de neumático medio de 65 cm, un aumento de 1 cm, se corresponde con una disminución del 0,5 % del CRR.

$$FRR = \frac{k}{D_{ext}^{1/3}} \quad (2.7)$$

Donde,

$FRR$ , es la fuerza resistente a la rodadura, en N.

$k$ , es una constante.

$D_{ext}$ , es el diámetro exterior del neumático.

En el mismo sentido, Michelin[30] expone, que para una variación de 1 cm de diámetro exterior del neumático de turismo, manteniendo el resto de variables constantes, podemos reducir en torno a 1 % el CRR. En la figura 2.27, podemos ver un ejemplo en el que se representa esta variación.

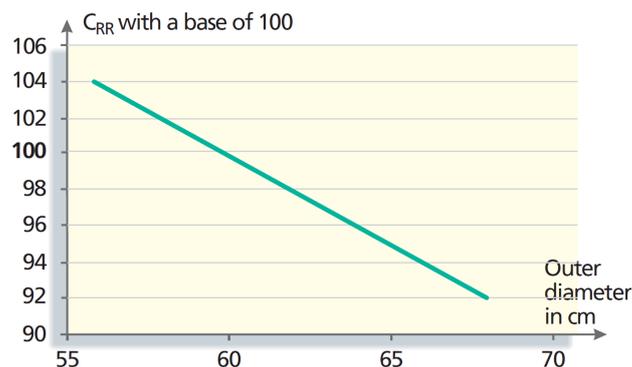


Figura 2.27: Variación del CRR con diámetro exterior

Finalmente, he querido comentar las conclusiones de un estudio relacionado, [43], donde se realizó un análisis estadístico de los factores de influencia en el CRR, basado en 170 neumáticos de turismo. En este estudio, se demostró que los parámetros con mayor influencia sobre el CRR son: el diámetro de la llanta, la relación de aspecto, las velocidades altas y la profundidad de la banda, en este orden. Los datos manejados en este estudio indican, que

un incremento de 2,54 cm en el diámetro de la llanta, se corresponde con un valor medio de reducción del CRR del 6,5 %. Suponiendo que la variación del diámetro de la llanta tiene una buena correlación con el diámetro exterior y estimando que aproximadamente el diámetro exterior de un neumático de turismo es un 65 % mayor que el diámetro de la llanta (según tablas ETRTO[15]), podríamos encontrar la siguiente relación: para un aumento de un 1 cm en el diámetro exterior de un neumático, cuyo diámetro exterior es de 65 cm, se puede estimar una reducción media del CRR del 1,7 %.

Cualesquiera de las conclusiones, vienen a decir lo mismo, que se produce una disminución del CRR, al aumentar el diámetro exterior del neumático. Esto se debe, muy probablemente, a que la flexión del neumático, al entrar en el área de contacto, se suaviza al incrementar este diámetro.

Por otro lado, si observamos el efecto que tiene variar el ancho de diseño del neumático, Shcuring[41] analiza, a través de la figura 2.28, que un aumento de este parámetro, puede producir una reducción en torno a 1,5 % del CRR. Un motivo asociado podría ser, que un aumento del ancho de la sección, produce un acortamiento de la huella de contacto y por tanto, menos material sometido a histéresis.

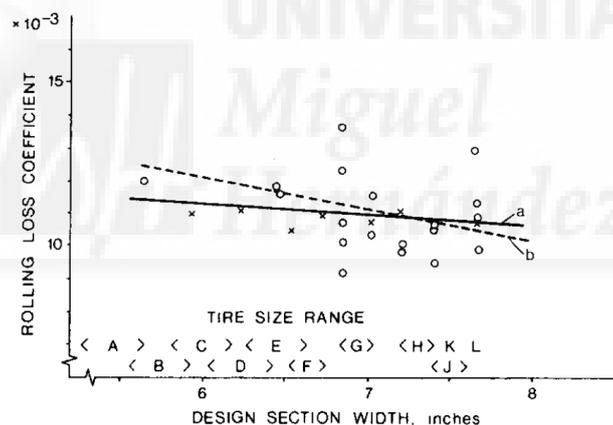


Figura 2.28: Variación del CRR con el ancho de la sección

Otro factor dimensional que guarda relación con el CRR, es la relación de aspecto, expresión en tanto por cien del cociente entre la altura del flanco de un neumático y el ancho de su sección. Podemos encontrar en la referencia [42], un estudio detallado, donde se analiza como varía la FRR a través de la ecuación (2.7), variando y/o manteniendo constantes los factores dimensionales que definen la relación de aspecto.

### Dibujo y espesor de la banda

En ocasiones, un dibujo u otro de la banda puede contribuir a una mejora de la transmisión de calor, o a una reducción de los esfuerzos producidos en la huella de contacto, pero algunas investigaciones, [41], nos muestran que no se aprecian grandes diferencias en el CRR, cuando cambiamos drásticamente el dibujo de la banda de rodadura sin variar el resto de

los parámetros. Por tanto, las variaciones del CRR para distintos patrones de banda, en un mismo conjunto de ensayos, con neumáticos de igual dimensión y estructura, no van a ser significativos. Por el contrario, el espesor de la banda, es un aspecto fundamental y uno de los principales parámetros de diseño de la banda, que afectan directamente al CRR, muy probablemente, por variar la cantidad de material concentrado en la zona de deformaciones.

En este sentido, Luchini[44], sobre una muestra de 18 neumáticos de camión nuevos (figura 2.29a) y una muestra de 10 de neumáticos de camión usados (figura 2.29b), intentó relacionar la variación del CRR, con el espesor restante de banda. Para lo cual, fueron raspando la banda de rodadura y realizando de nuevo los ensayos, con distintos porcentajes de material de banda: 95 %, 75 %, 50 % 25 % y 0 %. Observaron con estos ensayos, que el espesor de la banda conforme se fue eliminando, produce una reducción de la resistencia a la rodadura y por consiguiente del CRR.

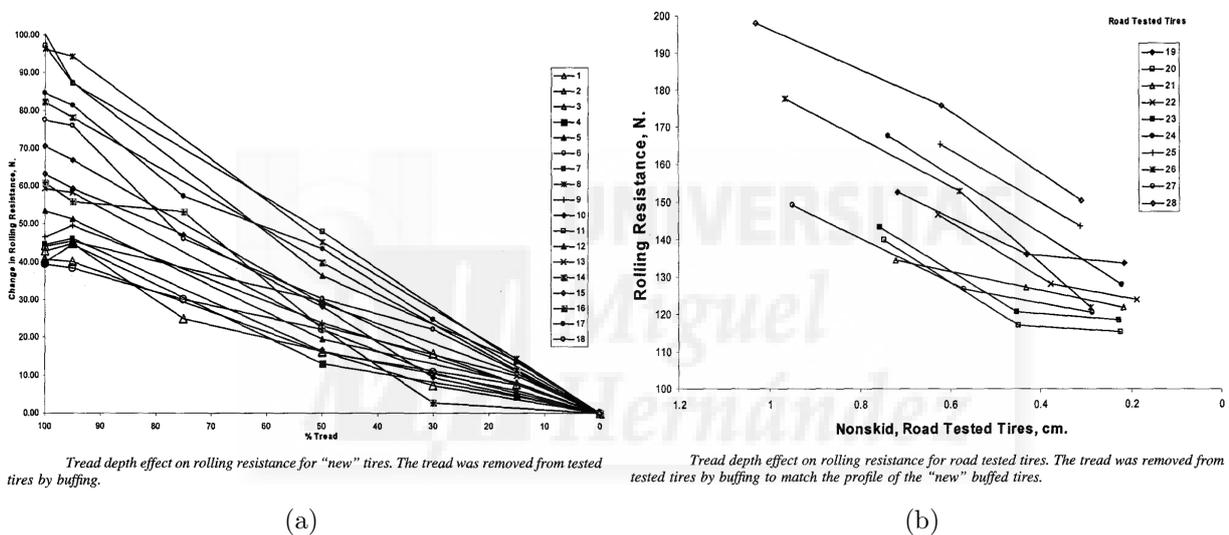


Figura 2.29: Variación del CRR con el espesor de banda

Es por tanto, que toma especial interés este parámetro a la hora de reducir el CRR. Siendo una de las consideraciones a tener en cuenta, en el diseño de neumáticos. Debido a ello, se suele buscar mejorar la calidad de materiales y la composición de la goma de banda empleados, con el objetivo de disminuir el espesor de la banda, sin que se vea afectada la vida útil del neumático, o lo que es lo mismo, sin aumentar su desgaste por abrasión.

### Materiales utilizados

El material usado en un neumático, tiene un impacto directo en el CRR. Este, tiene la misión de controlar la energía disipada por el neumático. La formulación del caucho, así como la composición de los diferentes materiales que lo conforman, juegan un papel indispensable.

Se estima, que alrededor del 70 % de las pérdidas de un neumático suceden en la zona de la banda y hombros, el 30 % restante se distribuye en la zona del flanco (15 %) y el talón

(15%). La zona de la banda, está compuesta, en parte, por la estructura interna (capa interna, estructura radial y demás lonas y cables de refuerzo) del neumático y, en parte, por la banda de rodadura. Pero en porcentaje de masa, la banda, representa aproximadamente el 70% del caucho en esta zona. Debido a esto, la composición del caucho, es uno de los principales focos de atención para buscar reducciones del CRR, [14].

Para conseguir estas reducciones, no solo basta con encontrar la formulación del caucho apropiada, donde la composición de cauchos natural o sintético y los aditivos como la sílice son fundamentales. Además, hay que tener en cuenta que uno de los principales problemas que tienen estos compuestos, es su dificultad para mezclarlos y para que, una vez vulcanizados, la distribución de las partículas y los enlaces de los polímeros, sean homogéneas. Además, hay que tener en cuenta que hay otros factores como la adherencia o el desgaste, que se pueden ver afectados por un ajuste de los materiales, en búsqueda de un bajo CRR, [35][38].

Los materiales que forman la estructura del neumático, también juegan un papel importante en el mecanismo de histéresis del conjunto. No es lo mismo, un neumático de estructura radial, que uno de estructura diagonal. Habitualmente, estos últimos generan más pérdidas, debido a la distribución de la estructura en lonas diagonales, [45]. Hablaremos con más detalles del papel que juega una carcasa radial, en el apartado de pérdidas asociadas al estado de la carcasa.

Es por tanto que, no solo es importante la fórmula del caucho utilizado, si no que, además, el mezclado, la aplicación de los compuestos y el vulcanizado es fundamental; y por tanto, habrá que poner especial atención en el proceso de fabricación del neumático.

### **Superficie de rodadura**

En base a algunos autores conocidos [30], las medidas que se han realizado sobre diferentes superficies, muestran un incremento proporcional del CRR con la macrorrugosidad de la superficie de la calzada. El CRR, también puede aumentar con la microrrugosidad, pero está más asociada a otros factores como la adherencia en superficies mojadas.

Otro factor, que influye en el CRR debido a la superficie de rodadura, es la dureza de dicha superficie. Una superficie dura y rígida como el acero, es capaz de devolver toda la energía que se le aplica, en cambio, si la superficie es blanda o flexible, esta será deformada con el paso del neumático, y parte de esa energía consumida en deformar el terreno, será disipada en forma de calor. Es por ello, que para mantener las mismas condiciones de velocidad y carga, cuanto más blanda sea la superficie, mayor será el CRR.

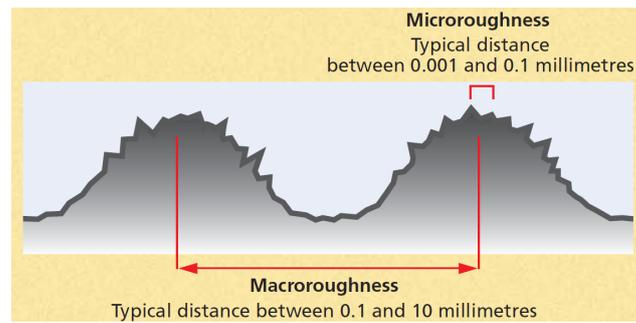


Figura 2.30: Diferencia entre macro y micro rugosidad

## 2.4.2. Factores adicionales asociados al recauchutado

### Estado de la carcasa

Como hemos visto en apartados anteriores, un neumático está compuesto de múltiples elementos, cada uno de ellos con su función. Estos elementos, una vez puesto en circulación, están sometidos a diversos esfuerzos y agentes climatológicos. Es por ello, que un neumático se deteriora por el paso del tiempo, en varios sentidos. Si el neumático no está en uso, los compuestos tienden a modificar su estructura con el paso del tiempo, envejecen o se degradan. Este efecto, cuesta un poco más apreciarlo, debido a que se requiere mayor tiempo para percibir los cambios, entre 5-10 años. Pero los deterioros más habituales, como la fatiga de los elementos y desgaste de la banda, debidos a la puesta en circulación de éstos, se dan más a corto plazo, entre 1-3 años. A este último, hay que añadir, que nos podemos encontrar con una carcasa recauchutada y que algunas de ellas, como las de camión, pueden permitir hasta dos recauchutados. Lo que multiplicaría por 3, el efecto de la fatiga de los elementos. Este efecto, se puede contabilizar en unidades de tiempo, por kilómetros recorridos o por nº de recauchutados, y dependerá siempre, de la utilización que se le haya dado al neumático. Por ejemplo, no será lo mismo la distancia recorrida en carretera, que la distancia recorrida en terrenos hostiles como una cantera, una cementera, en obras o en servicios forestales.

El uso prolongado de un neumático, produce flexiones, compresiones y cizallamientos en toda su composición, esto hace que los materiales rocen entre sí, lo que puede ir acompañado de sobrecalentamientos. Estas situaciones, van provocando que los materiales de la estructura se vayan desgastando. Un ejemplo muy cercano, es el propio desgaste de la banda de rodadura a medida que se incrementan los kilómetros recorridos. Este desgaste, produce que la banda pierda rigidez y es la carcasa del neumático la que debe de soportar el resto de la carga. Es por ello, que, aunque ya hemos visto que el CRR mejora con la reducción del espesor de la banda, la carcasa se deteriora con el uso prolongado, y este efecto puede poner en compromiso la seguridad del vehículo, más aún, en condiciones severas de conducción o pavimentos irregulares.

En este sentido, y como podemos ver en la figura 2.31, Luchini [44] detectó, comparando neumáticos nuevos y usados en diferentes grados de desgaste, que había diferencias signifi-

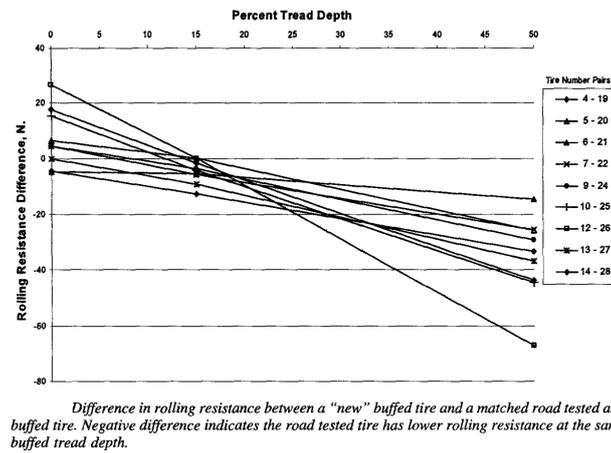


Figura 2.31: Variación del CRR con el estado de la carcasa

cativas entre ellos, concluyendo:

*“Parece que hay un efecto debido a la distancia o la edad [...] Se sabe que las propiedades del caucho cambian con el ciclo y el envejecimiento, algunos compuestos muestran efectos de compresión y también es posible que el uso de la carretera pueda afectar la carcasa del neumático de tal manera que su forma natural cambie.”*

En este mismo sentido, el proyecto *“Retreaded Tyres Project”* (RETYRE) [46] y un estudio posterior realizado por ETRTO [15], han analizado diversos parámetros de influencia en el CRR, asociados al estado de la carcasa. Hay que remarcar, que el estudio realizado en esta tesis se inició en paralelo a estos dos estudios, antes de que se publicasen resultados de los mismos y que por tanto, no se han podido tener en cuenta los resultados y conclusiones, para diseñar nuestro plan de ensayos. Sin embargo, podrán ser comparados con los resultados obtenidos.

Debido a que recogen de alguna manera, algunos de los factores de influencia sobre el CRR, he creído conveniente comentar resumidamente, en que se han basada cada uno de ellos y a que conclusiones han llegado.

El proyecto RETYRE[46], en uno de sus objetivos principales, trató de identificar la influencia de la carcasa en el CRR, para tratar de aislarla y centrarse en la influencia de los parámetros del proceso de recauchutado. La búsqueda de esta influencia, se justifica en base a que el neumático tiene una variedad de usos muy amplia y el diseño de las carcasas está adaptado a dicho uso. El informe final refleja, que el proceso de selección de las carcasas, en muchas ocasiones, no distingue su procedencia y por tanto, el resultado final puede verse afectado por las características de las carcasas. En este sentido, el estudio pretendía en una primera fase, analizar el CRR de neumáticos usados con un historial conocido (dimensiones, edad, kilometraje y aplicación anterior, en buen estado para recauchutar) y neumáticos recauchutados sobre los mismos. Finalmente, por razones que no vienen al caso, no han podido realizar todos los ensayos que pretendían, no pudiendo completar el plan de ensayos y por

tanto, no se han publicado resultados más detallados sobre los parámetros de influencia en el CRR. Finalmente, estima un porcentaje de CRR, debido a la carcasa, entre el 50 y el 60 %.

El estudio de la asociación ETRTO [15], considera, que la principal contribución al CRR de un neumático, proviene de la carcasa; y ya que el proceso de recauchutado requiere de una carcasa de un NFU, resulta esencial verificar la influencia de esta. Para analizar esto, realizaron ensayos sobre una muestra de 224 neumáticos recauchutados, donde el 33 % se ensayaron sin banda de rodadura (raspadas). Para analizar la influencia de la carcasa, selecciona neumáticos de dos tamaños habituales (315/80 R22,5 y 385/65 R22,5), con edades de entre 3 y 5 años de antigüedad, dos tipos de uso (regional o largo recorrido), región de uso (Norte o Sur de Europa) y el número de veces que ha sido recauchutado (1 o 2). Más adelante, analizaron la influencia global de estos parámetros en el CRR de las carcassas, y su posterior influencia una vez recauchutados con los mismos compuestos. De las conclusiones que extrajeron, vamos a destacar dos:

- De las carcassas ensayadas, concluye, que hay grandes variaciones en el CRR (por ejemplo: una variación de 2,5 N/kN entre el valor mínimo obtenido y el máximo para las carcassas de medidas nominales 315/80 R22.5), fruto de la gran variedad de carcassas que hay en el mercado. Lo que hace realmente difícil, obtener un valor medio aceptable de todas las carcassas de la misma medida.
- De los neumáticos recauchutados con el mismo proceso y los mismos componentes, utilizando las carcassas mencionadas en el anterior punto, concluye de nuevo, que el origen de la carcasa tiene un fuerte impacto en el resultado final, siendo los parámetros más significativos: la marca de la carcasa, el estado individual de cada una y su edad. El resto de los parámetros, analizados por separado, no demostraron una influencia significativa, aunque tomados todos en conjunto, sí podrían tenerla.

### Proceso de recauchutado

El proceso de recauchutado también puede influir en el CRR, ya que el estado final del neumático depende de ello. En el recauchutado se puede llegar a aprovechar hasta el 70 % de un neumático usado. De este porcentaje, la principal parte aprovechada es la carcasa raspada, aunque en ocasiones se usa el caucho raspado como aditivo en las gomas de banda. Por tanto, para obtener un neumático recauchutado, hay que añadir ese 30 % restante. Este restante añadido, pertenece principalmente a la banda de rodadura, aunque dependiendo del recauchutado, en ocasiones se elimina y se añade material en los flancos (recauchutado en caliente).

En el caso de que todas las carcassas sean iguales, y no aporten variabilidad en el cálculo del CRR una vez recauchutadas, los principales factores de influencia podrían ser: el proceso

de adición de caucho, las propiedades del material o la geometría final. En este sentido, el proyecto RETYRE[46] y el estudio ETRTO[15], han analizado diversos parámetros de influencia asociados al recauchutado. Al igual que en el apartado anterior, no se ha podido diseñar nuestro plan de ensayos basadas ellos, pero podrán ser comparados con los resultados obtenidos. A continuación, se comentarán las principales conclusiones.

En primer lugar, el proyecto RETYRE [46], en búsqueda de analizar el impacto de distintos factores en el CRR derivados del recauchutado, utilizó en un total de 135 carcassas de neumáticos usados, tanto recauchutados en caliente como recauchutados en frío, y basado en muestras de dos medidas, 385/65 R22,5 y 315/80 R22,5. Las carcassas usadas, fueron seleccionadas del mismo fabricante, con la misma edad y en condiciones comparables. La variabilidad del CRR con respecto a los parámetros analizados, los expongo a continuación, reflejando además, alguna de las conclusiones obtenidas:

- Variación del espesor de la sub-banda de rodadura. Se concluye, que el CRR incrementa linealmente, con el espesor de sub-banda (variable comparable al espesor de la goma de unión).
- Variación del radio de raspado. Concluye, que a mayor radio de raspado, mayor CRR.
- Variación de aplicado de banda en recauchutado en caliente. Diferencia entre enrollado de la banda (orbitread) o aplicación de una banda extruida sin curar (camelback). Obtiene, que el CRR no se ve afectado, por el tipo de aplicación de la banda.
- Variar el proceso de recauchutado. Diferencia entre recauchutado en caliente y frío. Concluye, que los neumáticos recauchutados en caliente presentan mayor CRR, que los recauchutados en frío. Pero añade, que esta variación puede ser por las grandes diferencias entre procesos, y que debido a ello, unos requieren introducir más masa o espeso de banda nueva. Por tanto, para analizar mejor la variación entre proceso, se debería incluir en el análisis el diámetro exterior y el perfil del hombro.
- Variación de la banda de rodadura (espesor de banda, ancho de banda, dibujo, banda precurada o moldeada en caliente). No ofrece conclusiones sobre todos los parámetros, pero si sobre dos de ellos:
  - El espesor de banda, tiene un pequeño efecto sobre el CRR
  - Los neumáticos recauchutados en caliente, presentan mayor CRR, que los recauchutados en frío.
- Composición de la goma. Diferencias entre aplicar diferentes porcentajes de caucho natural y sintético a la mezcla de goma agregada. Concluye, que los resultados que menor CRR han resultado tener, son los que poseen mayor porcentaje de caucho natural.

En segundo lugar, el informe final del estudio realizado por ETRTO[15], en búsqueda de analizar el impacto de distintos factores en el CRR, utilizó 95 carcassas de neumáticos nuevos de dos medidas, 315/80 R 22,5 y 385/65 R22,5. Cada una de estas medidas, seleccionadas del mismo tipo y fabricante, fecha de fabricación próximas, con la misma banda precurada para los recauchutados en frío, el mismo compuesto de caucho y el mismo molde para los recauchutados en caliente, y finalmente, fueron recauchutados en la misma fabrica y con fechas de fabricación seguidas. La variabilidad del CRR con respecto a los parámetros que fueron analizados, las expongo a continuación, reflejando además, alguna de las conclusiones obtenidas:

- Variación del radio de raspado o “buffing radius” (800 y 2000 mm). Concluye, que el radio de raspado tiene un impacto elevado en el CRR, siendo el CRR mayor, a mayor radio de raspado. Remarca, que el radio de raspado se adapta en ocasiones dependiendo de la forma y geometría de la carcassa.
- Espesor de material restante después del raspado (espesor de la sub-banda de rodadura, con valores de 1 y 4 mm). Se concluye, que el CRR incrementa linealmente con el espesor de la sub-banda.
- Variación del espesor de la banda de unión (1.5 y 3 mm). Concluye, que el impacto es bajo y que aumenta normalmente el CRR, a mayor espesor de banda de unión.
- Temperatura de curado (95 y 125°C recauchutado en frío; 135 y 160 recauchutado en caliente). Se concluye, que la temperatura de curado resultó, tener un impacto alto en los neumáticos recauchutados en caliente y bajo para los recauchutados en frío.
- Tiempo de curado (4 y 8 horas, recauchutado en frío; 110 y 145 minutos recauchutado en caliente). En este caso, concluye, que el tiempo de curado tienen un impacto bajo en los neumáticos recauchutados en caliente y muy bajo para los recauchutados en frío.
- Impacto global de todos los parámetros. Teniendo en cuenta que pueden estar presentes la variabilidad debida a todos los parámetros de fabricación el CRR puede cambiar hasta en 4 N/kN. Siendo los más relevantes: la temperatura de curado y el radio de raspado. Destaca, que al haberse utilizado neumáticos nuevos, en vez de neumáticos usados, el impacto en CRR para los recauchutados en caliente podría ser mayor, y que esto, además, puede ser debido a que el radio exterior de las carcassas de los neumáticos usados, suele ser algo mayor.

## 2.5. Métodos de ensayo de neumáticos en laboratorio

Normalmente, los ensayos de resistencia a la rodadura se llevan a cabo en bancos de ensayo de tipo tambor giratorio, donde el neumático es mantenido en contacto, a través de un actuador que ejerce una carga normal, a la superficie de rodadura. Al mismo tiempo, un motor acoplado al tambor, hace girar el neumático por fricción con la superficie.

Existen diferentes tipos y tamaños de bancos de ensayo para neumáticos, en la figura 2.32, vemos unos ejemplos y en la figura 2.33, un esquema típico de configuración de banco de ensayo. Como veremos más adelante, en este trabajo se van a definir las particularidades del banco de ensayo utilizado.



Figura 2.32: Ejemplos de bancos de ensayo

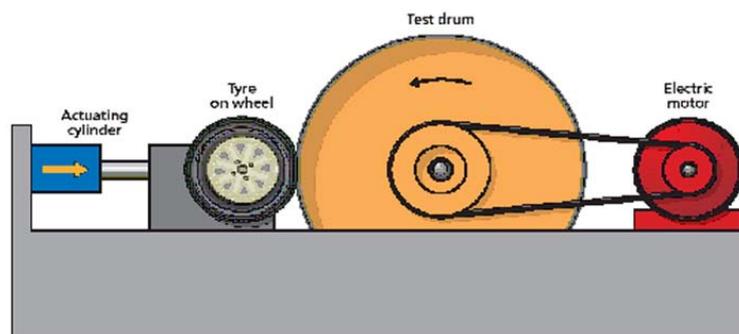


Figura 2.33: Esquema de funcionamiento bando de ensayos

En este apartado, vamos a describir los principales métodos de ensayo, para la obtención de la resistencia a la rodadura de un neumático y algunas de las principales normas de ensayo, aplicados a estos bancos. En casi todas estas normas, es habitual encontrar prescripciones para cuatro métodos de medición en banco diferentes: método de medición de la fuerza en el eje, método de medición del par aplicado en el tambor, método de medición de la potencia aplicada en el motor y método por deceleración libre del tambor.

La información expuesta a continuación esta extraída de varios autores, [14][47]. Por por

un lado, realizaremos un resumen de los principales métodos de medición en banco y por el otro, comentaremos las principales características de las normas de ensayo que describen como aplicar estos métodos.

Según se concluye de otros estudios [47], todos los métodos de ensayo en banco mencionados pueden ser comparables para las distintas alternativas de cálculo del CRR, pudiendo convertir las que solo miden FRR en CRR, dividiendo simplemente por la fuerza de ensayo. Esto no garantiza la equivalencia, ya que como veremos más adelante, cada método tiene sus particularidades e incluirá, en mayor o menor medida, pérdidas de uno u otro tipo; y en ocasiones, simplemente representan una condición de ensayo diferente. Para que los resultados sean comparables, hay que recurrir a métodos de alineación e intercomparación entre laboratorios.

### 2.5.1. Métodos de medición en banco

#### Pérdidas parásitas

Todos los métodos mencionados cuentan con pérdidas parásitas, en su mayor parte son pérdidas aerodinámicas y/o debidas al rozamiento en los rodamientos. Estas pérdidas, resultan muy difíciles de comparar con las pérdidas parásitas reales en condiciones de circulación, las cuales, dependerán de la geometría del vehículo, la calzada o los esfuerzos dinámicos debidos a la conducción. Es por tanto habitual, tratar de eliminar de alguna manera estas pérdidas, con el objetivo de obtener los valores de resistencia a la rodadura solo causados por el neumático. Debido a esto, todas las normas informan de la existencia de estas pérdidas y proponen un método de cálculo de las pérdidas parásitas, para ser descontadas del ensayo principal. El método consiste, en realizar un ensayo a baja carga, normalmente con un contacto mínimo entre rueda y tambor, y así, con los valores obtenidos, descontar del ensayo en carga, todas las pérdidas.

Se asumen como simplificación, que las pérdidas aerodinámicas durante el ensayo de pérdidas, son iguales que durante el ensayo en carga. Además, se sabe que las pérdidas en los rodamientos dependen de la carga aplicada y que por tanto, estas serán diferentes para el ensayo en carga y para el ensayo sin carga. Si las pérdidas en los rodamientos se caracterizan como una función de la carga (como es habitual encontrar en las especificaciones del proveedor), este efecto puede tenerse en cuenta en los cálculos. Sin embargo, con rodamientos modernos de baja fricción, las pérdidas que podemos encontrar en los mismos, son un porcentaje bastante más pequeño que las pérdidas totales. Por lo tanto, compensar la carga, rara vez tiene un efecto significativo.

Como podemos observar en la figura 2.34 [14], aproximadamente, para una velocidad de 80 km/h, de 50 N de FRR, 2,6 N son pérdidas aerodinámicas y 0,35 N son pérdidas en los rodamientos. Esto sitúa en un orden 200:7:1, las pérdidas por histéresis, de las aerodinámicas

y de las debidas a los rodamientos. Aunque, hayq eu tener en cuenta, que estas pérdidas dependen de la carga, la presión o la velocidad. Por otro lado, otros autores [48], concluyeron, que el orden de magnitud las pérdidas en los rodamientos en términos de CRR, podían ser de aproximadamente 0,1 N/kN.

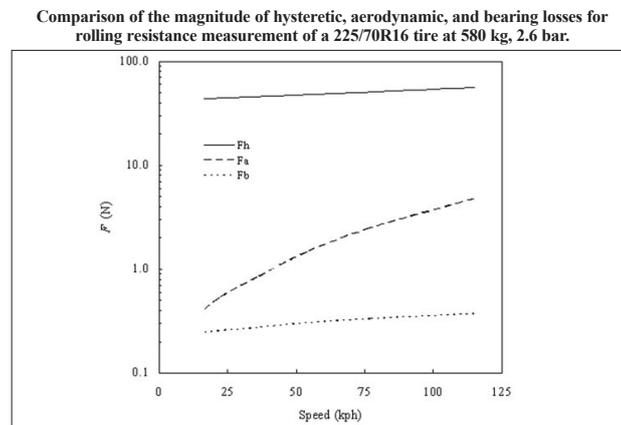


Figura 2.34: Comparación de pérdidas en banco de ensayo

Coincidiendo con estos autores y por motivos prácticos[14], la reglamentación [40] permite no tener en cuenta esta diferencia y, en consecuencia, se ha decidido no tener en cuenta en este estudio las pérdidas en rodamientos variables con la carga y, por tanto, no se han corregido los valores obtenidos del CRR teniendo en cuenta este efecto.

### Método de fuerza

El método de fuerza, obtiene de forma directa la FRR, medida como reacción en el eje de la rueda, mediante un sensor de carga. Mientas, otro sensor mide y controla la fuerza normal que mantiene en contacto el neumático en el tambor, y un tacómetro, controla la velocidad del ensayo. La resistencia a la rodadura es calculada de la siguiente manera:

$$FRR = F_t [1 + (r_L/R)] - FRR_{pl} \quad (2.8)$$

Donde,

$FRR$ , es la fuerza resistente a la rodadura, en N.

$F_t$ , es la fuerza en el eje de la rueda, en N.

$r_L$ , es la distancia del eje del neumático a la superficie del tambor en condiciones establi-zadas, en m.

$R$ , es el radio del tambor de ensayo, en m.

$FRR_{pl}$ , es la fuerza resistente a la rodadura debida a pérdidas parásitas, en N.

Este método, tiene una ventaja que lo destaca frente a los demás y es, que la única fuente de error, son las pérdidas de los rodamientos del eje de la rueda. En su contra, podemos encontrarnos con dificultades para tener las cargas alineadas y leer fuerzas parásitas en el sensor, producidas por las interacciones entre la carga normal y las fuerzas que aparecen en el apoyo del eje de la rueda. Estas fuerzas, puedan producir errores significativos en la medición de la FRR.

### Método de par

El método de par, obtiene la FRR a través de la medición del par torsor del tambor con un sensor de par instalado en su eje. Mientas, otro sensor mide y controla la fuerza normal que mantiene en contacto el neumático en el tambor, y un tacómetro, controla la velocidad de ensayo. La resistencia a la rodadura, es calculada mediante un equilibrio de momentos, quedando la expresión de la siguiente manera:

$$FRR = \frac{T_t}{R} - FRR_{pl} \quad (2.9)$$

Donde,

$FRR$ , es la fuerza resistente a la rodadura, en N.

$T_t$ , es el par ejercido, en Nm.

$R$ , es el radio del tambor de ensayo, en m.

$FRR_{pl}$ , es la fuerza resistente a la rodadura debida a pérdidas parásitas, en N.

La principal ventaja, es que la medida es casi directa, ya que solo a través de la medida del par neto ejercido en el eje y el radio del tambor, podemos obtener la resistencia a la rodadura. En su contra, la medida incluye las pérdidas aerodinámicas y en rodamientos del tambor, pero se puede realizar un ensayo de pérdidas para descontarlas. Por otro lado, puede incluir errores asociados con aceleraciones transitorias, aunque estas se pueden minimizar si se obtiene un promedio del par en un periodo de tiempo muy cercano al valor deseado.

### Método de potencia

Este método, obtiene la FRR a través de la medición, con un vatímetro, del incremento de potencia necesaria para mantener el tambor a una velocidad constante y a una carga constante. Esta potencia, es equivalente a la potencia necesaria para compensar la energía disipada en forma de resistencia a la rodadura. La resistencia a la rodadura es calculada con la siguiente expresión:

$$FRR = \frac{3,6 \cdot V \cdot A}{U_n} - FRR_{pl} \quad (2.10)$$

Donde,

$FRR$ , es la fuerza resistente a la rodadura, en N.

$V$ , es la tensión eléctrica aplicada al mecanismo impulsor de la máquina, en V.

$A$ , es la corriente eléctrica consumida por el mecanismo impulsor de la máquina, en A.

$U_n$ , es la velocidad del tambor de ensayo, en km/h.

$FRR_{pl}$ , es la fuerza resistente a la rodadura debida a pérdidas parásitas, en N.

La principal ventaja de este método, es la facilidad de implementación, ya que no requiere de sensores de fuerza o par. Sin embargo, el método no tiene en cuenta las pérdidas parásitas debido al motor o la transmisión, lo que requiere de una calibración del motor, para obtener datos precisos. Esto supone, en ocasiones, que es necesario obtener la curva de eficiencia, en función de la velocidad y la potencia de salida. Además, puede ser necesario añadir al sistema, elementos eléctricos (filtros, apantallamientos, reguladores, ...), que eviten las fluctuaciones de energía.

### Método de deceleración

Este método, obtiene la FRR a través de la medición del tiempo que tarda un neumático, rodando en el tambor del banco de ensayo, en pasar de una velocidad a otra inferior. El neumático, tras una fase de calentamiento o equilibrio de temperaturas a velocidad y carga constantes, se acelera ligeramente por encima de la velocidad de medición y a continuación, se desconecta el motor hasta una velocidad inferior a la velocidad de calentamiento. Es en este instante, donde se mide con un tacómetro el tiempo y la velocidad del cambio de estado. Esto permitirá, registrar un número suficiente de valores alrededor de la velocidad de ensayo, para hacer los procesos de cálculo posteriores. La resistencia a la rodadura para una velocidad constante, se puede calcular de forma discreta o continua, para este último caso la expresión es la siguiente:

$$FRR = \frac{I_D}{R} \cdot j_V + \frac{R \cdot I_T}{R_r^2} \cdot j_V - FRR_{pl} \quad ; \quad \left( FRR_{pl} = -\frac{I_D}{R} \cdot j_{D0} - \frac{I_T}{R_{r0}^2} \cdot j_{T0} \right) \quad (2.11)$$

Donde,

$I_D$ , es la inercia del tambor de ensayo, en  $kg \cdot m^2$ .

$I_T$ , es la inercia del eje, neumático y rueda, en  $kg \cdot m^2$ .

$R$ , es el radio del tambor de ensayo, en m.

$j_V$ , es la deceleración angular del tambor, en  $rad/s^2$ .

$j_{D0}$ , es la deceleración angular del tambor de ensayo sin contacto con el neumático, en  $rad/s^2$ .

$j_{T0}$ , es la deceleración angular del neumático sin contacto con el tambor, en  $rad/s^2$ .

$R_r$ , es el radio de rodadura del neumático bajo carga, en m.

$R_{r0}$ , es el radio de rodadura del neumático sin carga, en m.

Este método tiene como ventaja, que es relativamente fácil de implementar si ya poseemos un banco de ensayos de neumáticos. Además, permitiendo el desacoplamiento del motor, no hay errores transitorios en el controlador de velocidad, que pueden aparecer si usamos otros métodos. En su contra, ya sea en cálculo por diferencias finitas de velocidad o a través de la pendiente de la curva de velocidad, exige cierta precisión en la medida de velocidad, debiendo considerarse la variabilidad y grado de regresión de los datos, para analizar la precisión obtenida. Otro problema que puede surgir, es fruto del cálculo de un valor de inercia adecuado del conjunto eje, neumático y rueda. La norma, permite estimar gráficamente el valor de inercia del conjunto, lo que parece bastante impreciso, y por esto, propone además, varios ensayos para la obtención de un valor adecuado, lo que exige de la creación de un pequeño montaje, sensores y análisis de la precisión.

En este método, el ensayo de pérdidas se realiza con el neumático y el tambor desconectados, lo que supone, que no se incluyan las pérdidas por fricción, debidas al contacto neumático y tambor. Algunos autores llegaron a la conclusión, de que el método por deceleración, era menos sensible a las diferencias entre neumáticos y menos preciso que los otros [49]. Otros autores comentaron, que quizás podría ser debido a no restar estas pérdidas a la resistencia a la rodadura, por lo que llego a ser extraído de las normas SAE [14]. En contraposición, es un método que está incluido en la norma ISO:28528:2009 [40] y también en el Reglamento (CEPE/ONU) N°117 [13] (recientemente actualizado, a 20 de enero de 2016), por lo que se entiende, que se sigue considerando un método totalmente válido.

En cualquier caso, se debe tener en cuenta estos detalles a la hora de realizar los ensayos por este método, debido a que es posible que se observen algunas diferencias en el CRR, al comparar resultados con publicaciones realizadas con los otros tres métodos. Por tanto, se recomienda tener presente, que el método por deceleración puede incluir en sus resultados un efecto debido al rozamiento del neumático con el tambor, debido a que este efecto no se ha sustraído con el ensayo de pérdidas (no contemplados al separar el neumático del tambor).

En este sentido, algunos autores manifiestan [14], que podría ser una medida más realista del CRR, ya que incluyen los efectos del rozamiento con la calzada. Pero se entiende que esto podría ser así en el caso de tener un tambor texturado que represente de algún modo más parecido la calzada. Además, cuando la superficie es de acero, totalmente lisa, el efecto de pérdidas debido la fricción en el ensayo de pérdidas, podría ser despreciable.

## 2.5.2. Principales normas de ensayo

### Norma SAE J1269

Esta publicación de la Sociedad de Ingenieros de Automóviles (SAE), describe una serie de recomendaciones prácticas para medir en laboratorio, la resistencia a la rodadura de neumáticos de vehículos de pasajeros, camiones ligeros, camiones pesados y autobuses [50]. Su primera versión, data de 1979 y su última revisión, se realizó en septiembre de 2006. La norma incluye dos tipos de métodos, uno con múltiples puntos de medición y otro, añadido en la última revisión, de un solo punto de medida.

Ambos métodos, utilizan, normalmente, un banco de ensayo tipo tambor de 1,7 m de diámetro, con una superficie rugosa tipo lija de grano 80. Permite tres métodos de medición: fuerza, par y potencia. La temperatura de referencia es 24°C, permitiendo rangos de ensayo de 20÷28°C. La velocidad del ensayo es de 80 km/h, en ambos casos.

El ensayo múltiple (Multi Point Test o MPT), se basa en la obtención del CRR usando uno de los métodos y condiciones descritas anteriormente, combinando varios estados de carga y presión. Dependiente del tipo de neumático, se realizará la medición en 4 estados de carga-velocidad para turismos, en 5 para camiones pesados y autobuses, y 6 para camiones ligeros. Los estados de presión, se combinan entre bajas presiones, altas presiones controladas (regulador de presión) y presiones de evolución libre (válvula cerrada). Mientras que el ensayo simple (Single Point Test o SRC), se basa en la obtención del CRR usando uno de los métodos y condiciones descritas anteriormente, en un solo estado de carga y presión.

### Norma SAE J2452

Esta publicación, describe una serie de recomendaciones prácticas para medir en laboratorio la resistencia a la rodadura, mediante una secuencia “stepwise coastdown” [51]. Esta secuencia, trata de simular las condiciones en carretera de neumáticos de vehículos de pasajeros, camiones ligeros o similares, aprobados por TRA. Fue publicada por primera vez en 1999. El procedimiento se basa en la obtención del FRR en varios puntos con diferentes estados de carga y presión, y posteriormente, obtener un valor promedio del valor de fuerzas, llamado “*Mean Equivalent Rolling Force*” (MERF), que es diferente para cada estado de carga y presión. Por otro lado, propone otro valor promedio de de FRR a una presión y

carga definida en la norma. Este valor, es llamado “*Standard Mean Equivalent Rolling Force*” (SMERF) y tiene la misión de utilizarse como valor representativo, para comparación entre neumáticos.

El método, se lleva a cabo normalmente, en banco de ensayo tipo tambor de 1,2 m de diámetro, pero permite diámetros mayores. La superficie del tambor, debe ser rugosa con textura tipo lija de grano 80. Esta norma, está diseñada para dos de los cuatro métodos de medición: fuerza y par. La temperatura de referencia es 24°C, permitiendo rangos de ensayo de 20÷28°C. La velocidad del ensayo a diferencia de las demás normas se obtiene de un registro de deceleración de rango 115 a 15 km/h para cada estado de carga y presión. Dependiente del tipo de neumático, medición de 4 estados de carga y presión para turismos y 5 para camiones ligeros. Los estados de presión se combinan entre bajas, medias presiones y la presión de trabajo controladas con regulador de presión.

### **Norma ISO 18164:2005**

Esta norma internacional publicada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) especifica métodos para obtener el CRR bajo condiciones controladas en laboratorio para neumáticos nuevos de turismo, camión, autobuses y motocicletas[52]. Fue publicada por primera vez en 2005 y sustituye, porque las recoge, a las normas ISO 13327:1998[53], ISO 8767:1992[54] e ISO 9948:1992[55].

La norma se basa principalmente en la obtención del CRR en un solo punto de medida, pero también propone como alternativa, si se desea tener en cuenta la dependencia del valor de resistencia a la rodadura con otras variables como la velocidad, la realización del mismo ensayo a velocidades distintas. Por otro lado, si se desea tener en cuenta la variación de la resistencia a la rodadura con la presión y la carga, la realización de un tipo de ensayo múltiple con diferentes estados de carga y presión similar a los planteados en la norma SAE 1269.

El método se lleva a cabo normalmente en un banco de ensayo tipo tambor de diámetro mayor o igual a 1,5 m para neumáticos de turismos y motocicletas y de 1,7 m para el resto, pero permite diámetros mayores proponiendo un factor de corrección basado en un tambor de referencia de 1,7 m. La superficie del tambor, normalmente es lisa, pero acepta superficies rugosas, si se anota el grado de textura en el informe de ensayo. Permite, cuatro métodos de medición: fuerza, par, potencia y deceleración. La temperatura de referencia es 25°, permitiendo rangos de ensayo de 20÷30°, proponiendo un factor de corrección basado en la temperatura de referencia.

La velocidad del ensayo es en la mayoría de neumáticos de 80 km/h, salvo en neumáticos de camión con índices de carga mayor que 121 y código de velocidad de F a J (de 60 a 100

km/h) que se realiza a una velocidad de 60 km/h y en neumáticos de motocicleta con código de velocidad menor que M que la velocidad de ensayo son 50 km/h.

El ensayo múltiple (MPT), se basa en la obtención del CRR en múltiples puntos, usando uno de los cuatro métodos propuestos y las condiciones descritas anteriormente, en varios estados de carga y presión. Dependiente del tipo de neumático, se relajará la medición de 4 estados de carga-velocidad, para turismos y en 5 para camiones y autobuses. Los estados de presión se combinan entre bajas presiones, altas presiones controladas (regulador de presión) y presiones de evolución libre (válvula cerrada). Por otro lado, el ensayo simple (SRC) se basa, en la obtención del CRR en un solo punto, usando uno de los cuatro métodos propuestos y las condiciones descritas anteriormente, con un solo estados de carga-presión y a una única velocidad.

Esta norma, también propone un ensayo de múltiples velocidades, que se basa en la obtención del CRR usando la variante de ensayo estándar de un solo punto o estado de carga y presión de evolución libre, uno de los cuatro métodos propuestos y las condiciones descritas anteriormente, a diferentes velocidades. Dependiente del tipo de neumático, propone velocidades de ensayo de 50, 90 y 120 km/h para neumáticos de turismo y de 80 y 120 km/h para camión.

### **Norma ISO 28580:2009**

Esta norma internacional, publicada por la Organización Internacional de Normalización (ISO), especifica métodos para obtener el CRR bajo condiciones controladas en laboratorio, tanto para neumáticos nuevos de turismo como de camión, así como de autobuses[40]. Fue publicada por primera vez en 2009 y es una vía alternativa de ensayo a la norma ISO 18164:2005[52]. Esto es viable, porque ambas están en vigor, y es el laboratorio el que decide cual utilizar, salvo que venga impuesto por regulaciones. La norma se basa en la obtención del CRR con el tipo de método descrito de un solo punto de medida. Esta norma añade, diferenciándose en las demás, tolerancias para alinear máquinas de ensayo y un procedimiento de intercomparación entre laboratorios.

El método se lleva a cabo normalmente un banco de ensayo tipo tambor de 2 m, pero permite a través de un factor de corrección diámetros de tambor mayor o igual a 1,7 m con un tambor de referencia de 2 m. La superficie del tambor normalmente es lisa, pero acepta superficies rugosas, anotando en el informe de ensayo, el grado de textura. Permite cuatro métodos de medición: fuerza, par, potencia y deceleración. La temperatura de referencia es 25°C, permitiendo rangos de ensayo entre 20-30°C, proponiendo un factor de corrección basado en la temperatura de referencia.

El ensayo consta de un solo punto de medida, por uno de los cuatro métodos permitidos y se

realiza a una velocidad de ensayo de 80 km/h, salvo en neumáticos C3 con índices de carga mayor que 121 y código de velocidad de F a J (de 60 a 100 km/h), que se debe realizar a una velocidad de 60 km/h. La carga del ensayo depende del tipo de neumático, 80 % de la capacidad máxima de carga en neumáticos C1 y 85 % de la capacidad máxima de carga para utilización simple en C2 y C3. La presión de inflado es de 210 kPa para C1 normal, 250 kPa para C1 reforzado, o la presión máxima marcada en el flanco para C2 y C3. La presión de inflado se fija, y se deja que evolucione libremente durante el ensayo. Esta norma, también propone, métodos de ensayo para el cálculo de las pérdidas.

### **Reglamento CEPE/ONU n° 117**

Este reglamento, es relativo a la homologación de neumático por lo que se refiere a las emisiones de ruido de rodadura, a la adherencia en mojado y/o a la resistencia a la rodadura, [13]. Establece en su anexo 6, los parámetros de determinación del CRR basado, principalmente, en la norma ISO 28580:2009[40].

Este reglamento es una transcripción casi idéntica a la norma antes mencionada, pero recientemente se ha añadido en su última revisión, algún detalle más que complementa el ensayo por el método de deceleración, incluyendo anotaciones para el cálculo diferencial de la deceleración y no solo el incremental como lo hace la norma ISO. Además, incluye un anexo A de recomendaciones de cálculo diferencial, por este método.

En la figura 2.35, podemos observar un esquema resumen de los principales métodos comparados, extraído del informe evaluación de ensayos en laboratorio, realizado por de la “*National Highway Traffic Safety Administration*” (NHTSA).

	ISO 28580 Draft		ISO 18164:2005(E)		SAE J1269				SAE J2452	
	Single Point		Multi Point		Single Point		Multi Point		Multi Point	
<b>Note</b>	Ref. ISO 28580 Draft		Annex B		SRC Conditions					
<b>Roadwheel Diameter</b>	2.0 m or > 1.7 m corrected to 2.0 m		1.5 m or greater		1.7 m commonly used		1.7 m commonly used		1.219 m or greater	
<b>Measurement Methods</b>	Force		Force		Force		Force		Force	
	Torque		Torque		Torque		Torque		Torque	
	Power		Power		Power		Power		Power	
	Deceleration		Deceleration							
<b>Roadwheel Surface</b>	Smooth (Texture Optional)		Smooth (Texture Optional)		Medium-coarse (80-grit) texture.		Medium-coarse (80-grit) texture.		Medium-coarse (80-grit) texture.	
<b>Temperature Range</b>	20 to 30 C		20 to 30 C		20 to 28 C		20 to 28 C		20 to 28 C	
<b>Reference Temperature</b>	25 C		25 C		24 C		24 C		24 C	
<b>Speed</b>	80 km/h		80 km/h (Optional passenger multiple speeds of 50 km/h, 90 km/h and 120 km/h. Optional truck/bus multiple speeds 80km/h & 120 km/h)		80 km/h		80 km/h		SRC = 80 km/h ; Coastdowns (115 to 15 km/h range)	
<b>Base Pressure</b>					Molded sidewall load at T&RA pressure		Molded sidewall load at T&RA pressure		Reference table in standard	
<b>Test Load and Pressure</b>	<b>Passenger</b>		<b>Passenger (Table B.1)</b>		<b>Passenger &amp; LT</b>		<b>Passenger</b>		<b>Passenger</b>	
	Load	Pressure	Load	Pressure	Load	Pressure	Load	Pressure	Load	Pressure
	SL 80%	210 kPa Capped	50%	+70 kPa reg.	70%	+20 kPa Regulated	90%	-50 kPa (-7.3 psi) Capped	30%	+1.4 psi reg.
	XL 80%	250 kPa Capped	50%	-30 kPa reg.			90%	+70 kPa (10.2 psi) reg.	60%	-5.8 psi reg.
			90%	+70 kPa reg.			50%	-30 kPa (-4.4 psi) reg.	90%	+8.7 psi reg.
			90%	-30 kPa reg.			50%	+70 kPa (10.2 psi) reg.	90%	-5.8 psi reg.
			<b>SLi 121 Highway Truck and Bus (Table B.1)</b>				<b>Light Truck (single)</b>		<b>Light Truck (single)</b>	
	Load	Pressure	Load	Pressure	Load	Pressure	Load	Pressure	Load	Pressure
	85%	100 % Capped	100%	100 % Capped	100%	100 % Capped	20%	110 %	20%	110 %
			100%	95 % Reg.	70%	60 % Reg.	40%	50 %	40%	50 %
			75%	70 % Reg.	70%	110 % Reg.	40%	100 %	40%	100 %
			50%	120 % Reg.	40%	30 % Reg.	70%	60 %	70%	60 %
			25%	70 % Reg.	40%	60 % Reg.	100%	100 %	100%	100 %
					40%	110 % Reg.				

Figura 2.35: Principales métodos de ensayos en banco

## 2.6. Otros métodos de ensayo

### 2.6.1. Método de remolque

Este método, consiste en llevar montado en un remolque especial, con uno o más neumáticos independientes de los neumáticos sobre los que circula el remolque, a los que se le puede aplicar carga. Este, es remolcado por un vehículo, hasta alcanzar una velocidad de ensayo, preferentemente constante. La resistencia a la rodadura se puede medir de varias maneras, entre ellas, mediante transductores de fuerza o mediante la medición del ángulo de desviación del brazo de medición, cuando este entra en contacto con la carretera.

Este ensayo, tiene la particularidad de que incluye en sus mediciones, la rugosidad del pavimento y las irregularidades de la calzada, obteniendo unos valores de resistencia a la rodadura más próximos a una circulación real. Dependiendo del remolque, este puede tener pérdidas debidas a elementos de la suspensión, pérdidas en los rodamientos o pérdidas aerodinámicas, que podrían estar presentes en las mediciones. Estas últimas pérdidas, se pueden reducir mediante el uso de deflectores o carrocerías adecuadas. Por el contrario, al tratarse de un sistema independiente, carece de elementos de transmisión y por tanto, no estarán presentes en las mediciones. Es, por tanto, un sistema capaz de reducir las pérdidas aerodinámicas y las debidas a la transmisión, que incluye, en mayor medida que otros métodos, la influencia en la resistencia a la rodadura introducida por el pavimento. Esta cualidad, lo convierte en un método muy adecuado, en comparación con otros métodos como el método “Coast-Down” o el método en banco de ensayos tipo tambor, para el estudio de la influencia en el CRR del pavimento.

Este tipo de remolques ha sido utilizado en varios proyectos y estudios [56][57][58][59], está considerado como una herramienta fundamental en el análisis de dicha influencia y ampliamente utilizado, para crear modelos de dependencia lineal de la resistencia a la rodadura con la carretera.

En la tercera parte del proyecto MIRIAM[56], se realiza una intercomparación entre tres remolques. En esta parte, los remolques han demostrado individualmente, una buena correlación entre ensayos a corto plazo, pero tienen una elevada dependencia de las circunstancias climatológicas o del momento en que se realiza el ensayo, así como, del propio diseño del remolque, lo que aumenta su variabilidad por encima de lo aceptable. Esta variabilidad, desafortunadamente, dificulta la intercomparación entre remolques. Es este sentido, el subproyecto concluye con la necesidad de realizar más investigaciones y sugiere que podría ser necesario, una norma que estandarice el remolque de medición.

### 2.6.2. Método Coast-Down

Este método, consiste en dejar que un vehículo decelere libremente, desde una posición y velocidad conocida, con el embrague desacoplado. Teniendo el peso del vehículo, registro de la velocidad, conociendo la pendiente longitudinal y lateral, y tomando datos ambientales como velocidad y dirección del viento, así como la presión atmosférica, podemos determinar qué cantidad de la fuerza medida es debida a la resistencia a la rodadura, que cantidad es debida a la resistencia lateral y que cantidad se debe a la resistencia aerodinámica.

Estos métodos, no tienen en cuenta los elementos debidos a la transmisión aguas arriba del embrague, pero si el resto de elementos hasta llegar a las ruedas. Al utilizar el vehículo completo, este conlleva todos los esfuerzos aerodinámicos y las pérdidas relacionadas con la suspensión real del vehículo. Por estas particularidades, este método es utilizado, principalmente, para analizar el coeficiente de pérdidas aerodinámico y los efectos en la resistencia a la rodadura, derivados de las irregularidades de la carretera.

Al utilizar un modelo completo de vehículo, se consigue que este método se asemeje a una conducción real, y permite analizar fenómenos que otros métodos no pueden realizar. En contra, esto exige un gran trabajo de modelización y parametrización, para poder distinguir entre los diferentes esfuerzos que actúan en un vehículo.

### 2.6.3. Método de consumo de combustible

Este método consiste en medir directamente el consumo de combustible del motor. Al igual que el anterior, este método utiliza un modelo completo de vehículo para obtener resultados. La principal diferencia es, que además se incluyen las pérdidas totales la fricción de los elementos aguas arriba del embrague, así como las pérdidas por el propio ciclo térmico del motor. Es esto último, lo que hace que este método sea más apropiado para el cálculo de pérdidas derivadas de variar parámetros en el motor, aunque ha sido utilizado por algunos autores como Schuring[60][61][62] o Knight[63], para analizar cómo afecta las pérdidas por rodadura, en el consumo de combustible.

### 2.6.4. Método de análisis por elementos finitos (MEF-FEA)

Con los años y el continuo desarrollo de los ordenadores, la simulación de problemas matemáticos por ordenador se ha convertido en una práctica habitual, en la que se incluyen el diseño y desarrollo de neumáticos. Esta práctica, nos permite simular diferentes condiciones de ensayo, sin tener el modelo físico, lo que lo convierte en una herramienta muy flexible. A cambio, requiere de un gran trabajo de modelización matemática, pruebas de caracterización de materiales, ensayos empíricos para desarrollar formulación específica, máquinas de cálculo potentes y tiempo de cálculo.

Un modelo tridimensional completo de un neumático puede contener más de 100 mil grados de libertad y modelos detallados más de 1 millón. Pero también existen modelos simplificados que permiten resolver en un tiempo y complejidad más reducida problemas de variación de parámetros o geometrías que permiten optimizar el diseño del neumático. En los modelos se debe integrar el cálculo estructural no lineal con el cálculo térmico y de transferencia de calor. Un ejemplo de este modelo, lo podemos ver en la figura 2.36, extraída de [14].

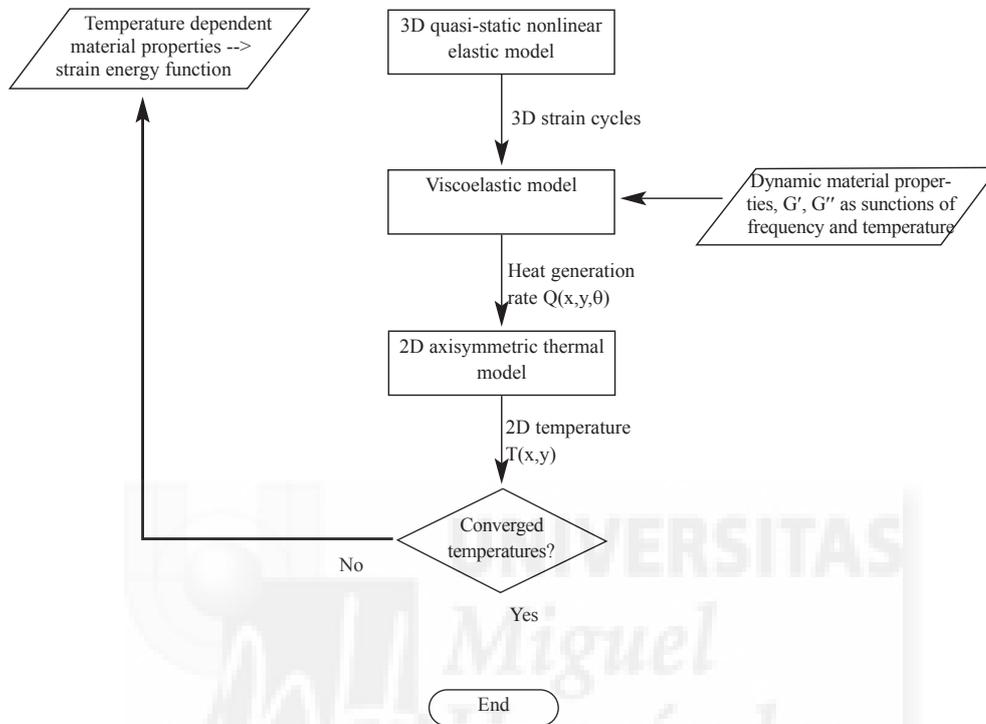


Figura 2.36: Secuencia de modelización por elementos finitos

Como hemos podido observar, la bibliografía sobre este tipo de modelos es muy extensa, [64][65][66][67][68]. No obstante, debido a la extensión de este campo, no se realizará un análisis detallado, lo que, además, excede del objeto de esta tesis.

## 2.7. Legislación asociada

### 2.7.1. Reglamento (CE) n° 661/2009

El Reglamento (CE) n°661/2009[1], establece un plan de aplicación sobre los requisitos mínimos en relación con la resistencia a la rodadura y el ruido de rodadura de los neumáticos, que abarca un rango de aplicación de noviembre de 2012 a noviembre de 2020. Algunas de las fechas más relevantes que cabría destacar, son: a partir de noviembre de 2012, se denegará la homologación de tipo CE a los nuevos tipos de neumáticos que no cumplan con las exigencias del cuadro 1 de la tabla 2.1; a partir de noviembre de 2016, se aumenta este nivel de exigencia a los valores del cuadro 2 de la figura 2.1; a partir de noviembre de 2017 se denegará la homologación de tipo CE a los vehículos que no dispongan de neumáticos que

cumplan con el cuadro 1; y finalmente destacar, que a partir de noviembre de 2020 todos los vehículos y neumáticos puestos a la venta o en circulación deberán de cumplir con las exigencias del cuadro 2.

Se estima, que la reducción de consumo de combustible del vehículo asociada a la reducción de la resistencia a la rodadura planteada por el reglamento, podría llegar a superar el 15 % en algunos casos. Estas exigencias no son por el momento aplicables a los neumáticos recauchutados, aunque el reglamento menciona que deberá replantearse esta situación en un futuro.

Tabla 2.1: Tabla de exigencias en materia de CRR

REQUISITOS RELATIVOS A LA RESISTENCIA A LA RODADURA

Los valores máximos del coeficiente de resistencia a la rodadura para cada tipo de neumático, medido según la norma ISO 28580, no superarán los indicados a continuación:

Cuadro 1

Clase de neumático	Valor máximo (kg/tonelada) 1ª fase
C1	12,0
C2	10,5
C3	8,0

Cuadro 2

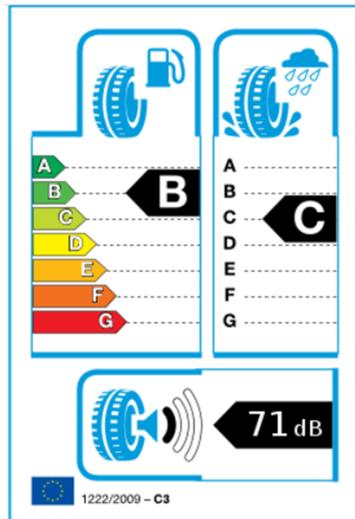
Clase de neumático	Valor máximo (kg/tonelada) 2ª fase
C1	10,5
C2	9,0
C3	6,5

Para los neumáticos de nieve, los límites del cuadro 1 y del cuadro 2 se aumentarán en 1 kg/t.

### 2.7.2. Reglamento (CE) nº 1222/2009

El CRR, se relaciona directamente con el consumo de combustible de un vehículo que monte estos neumáticos. Es uno de los tres factores que se muestra en el nuevo etiquetado europeo de neumáticos. Etiquetado recogidos por el Reglamento (CE) nº1222/2009[34] y de carácter obligatorio para los nuevos tipos de neumáticos a partir de noviembre de 2012. Se utiliza el CRR, para determinar la clase de eficiencia en términos de consumo de combustible. Valor que, junto a la clase de adherencia en superficie mojada, y la clase y valor medio de ruido de rodadura exterior, aparecen en la etiqueta normalizada, mostrada en el ejemplo de la figura

2.37.



(a) Ejemplo de etiqueta



(b) Parámetro de consumo

Figura 2.37: Etiquetado europeo de neumáticos

Dependiendo del tipo de neumático, C1 para neumático de turismo, C2 para neumático industrial de baja carga y C3 para neumático industrial de alta carga, la clase de eficiencia energética está ligada a una CRR, como podemos ver en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Clase de etiqueta del CRR

NEUMÁTICOS C1		NEUMÁTICOS C2		NEUMÁTICOS C3	
CRR en kg/t*	Eficiencia	CRR en kg/t*	Eficiencia	CRR en kg/t*	Eficiencia
$CRR \leq 6,5$	A	$CRR \leq 5,5$	A	$CRR \leq 4,0$	A
$6,6 \leq CRR \leq 7,7$	B	$5,6 \leq CRR \leq 6,7$	B	$4,1 \leq CRR \leq 5,0$	B
$7,8 \leq CRR \leq 9,0$	C	$6,8 \leq CRR \leq 8,0$	C	$5,1 \leq CRR \leq 6,0$	C
Vacía	D	Vacía	D	$6,1 \leq CRR \leq 7,0$	D
$9,1 \leq CRR \leq 10,5$	E	$8,1 \leq CRR \leq 9,2$	E	$7,1 \leq CRR \leq 8,0$	E
$10,6 \leq CRR \leq 12,0$	F	$9,3 \leq CRR \leq 10,5$	F	$CRR \geq 8,1$	F
$CRR \geq 12,1$	G	$CRR \geq 10,6$	G	Vacía	G

\*N/kN.

---

## Capítulo 3

### Definición del plan de ensayos





## 3.1. Desarrollo, análisis y ajuste del método de ensayo

### 3.1.1. Selección de la norma

Por un lado, el Reglamento (UE) n° 661/2009 en vigor [1], en materia de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por los neumáticos, establece en el anexo II parte B, que los valores máximos del CRR para cada tipo de neumático, deben ser medidos según la norma ISO 28580 [40].

Por otro lado, el Reglamento de etiquetado de neumáticos en el marco europeo, el Reglamento (CE) n° 1222/2009 [34], propone determinar la clase de eficiencia en términos de consumo de carburante en función del CRR, medido esta vez, utilizando el procedimiento descrito en el Reglamento CEPE/ONU n°117 [13].

A priori, podría parecer contradictorio que cada reglamento prescriba la utilización de una norma diferente, pero ya hemos vistos en el capítulo anterior, que las especificaciones de ensayo contenidas en ambas, son prácticamente coincidentes.

En conclusión, tras haber analizado todos los métodos y teniendo en cuenta la coincidencia mencionada entre la norma ISO 28580 [40] y el Reglamento CEPE/ONU n°117 [13], se toma la decisión de seguir las recomendaciones de la norma ISO 28580, que por una parte, contempla los cuatro métodos de ensayo y por la otra, es el método de ensayo especificado en el marco de regulación europeo de obligado cumplimiento.

### 3.1.2. Aplicación de la norma ISO 28580 al banco de ensayos de la UMH

Como ya hemos comentado en los antecedentes, los ensayos se realizarán haciendo uso del banco de ensayos disponible, que está configurado en origen para la realización de los ensayos tipo carga-velocidad.

Como se puede apreciar en la figura 3.1, la máquina consta de una estructura central que soporta un tambor rotatorio de 1,7 m de diámetro accionado por un motor conectado al tambor (1) mediante una transmisión por poleas y correa síncronas. A ambos lados de la estructura central, se encuentra dos puestos de ensayo de características simétricas (Puesto 1 y Puesto 2). Cada puesto dispone en su estructura de dos guías (2), sobre las que se desplaza un carro (3). Este carro, a su vez, en uno de los extremos soporta un eje (4) sobre el que se monta la rueda a ensayar (5) y por el otro extremo está sujetado a un pistón hidráulico (6) que es el encargado de aproximar el conjunto y mantener la fuerza (F) de contacto del neumático contra el tambor. El eje se ancla sobre dos apoyos articulados (7-8), que permite la medida del esfuerzo normal, eliminando otras componentes de esfuerzo. Estos apoyos, están diseñados en dos partes, una parte (7), articulada al carro que soporta

el peso de los ejes y otra parte (8), desmontable. Estos apoyos, permiten la fijación del eje al carro. Entre los apoyos articulados y el carro, se ubican dos sensores de fuerza, que permiten controlar y registrar la fuerza normal aplicada. La máquina es capaz de alcanzar fuerzas y velocidades tanto para ordenes de magnitud de neumáticos de turismo como de camión. Las características principales las podemos ver en la tabla 3.1.

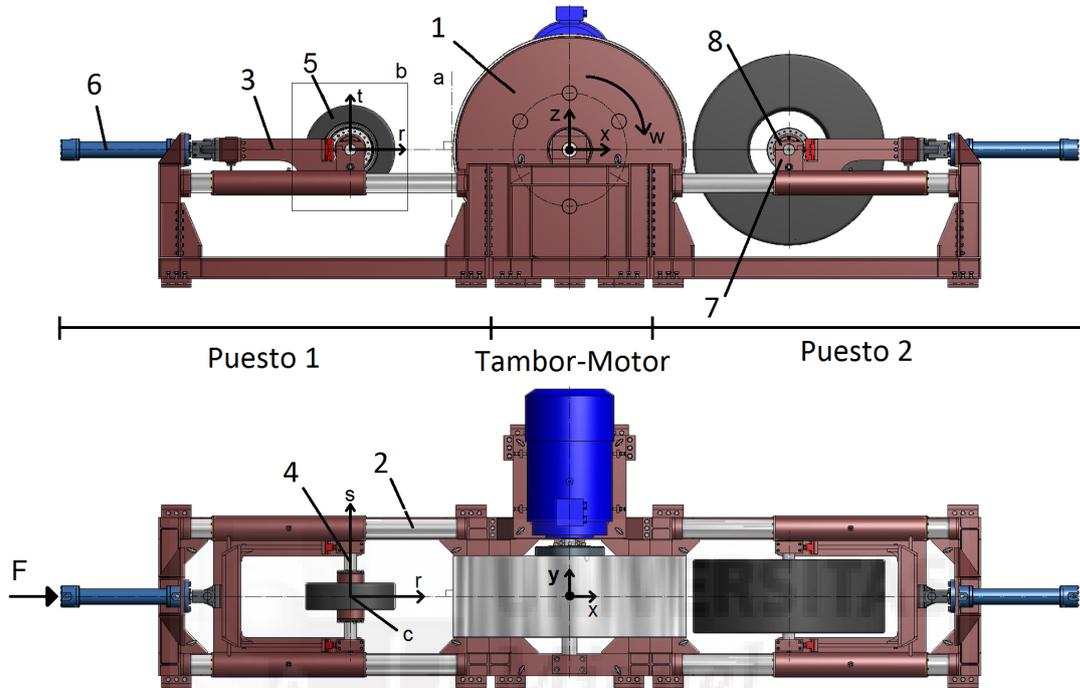


Figura 3.1: Banco de ensayos de la UMH

Tabla 3.1: Principales características del banco de ensayos de la UMH

Variable de control/Rango	Mínimo	Máximo
Velocidad (km/h)	30	270
Carga de ensayo (kg)	10	4750
Ancho de la sección (mm)	130	500
Diámetro exterior (mm)	500	1400
Control de temperatura (°C)	20	30

Volviendo a la figura 3.1, la máquina está diseñada y construida para que la fuerza aplicada por el cilindro esté alineada con el eje de intersección (x) del plano medio del tambor y el plano que contiene los ejes del tambor (y) y la rueda (s), y por tanto el plano (a) tangente a la superficie del tambor sea perpendicular a la dirección (x) del esfuerzo (F). De la misma manera, el diseño del eje (4) en el que se monta el conjunto llanta-neumático, está pensado para montar la rueda (5), de tal manera, que el plano medio de la rueda (r-t), sea perpendicular al plano (a) tangente a la superficie del tambor y paralelo a la dirección del movimiento de la superficie del tambor. Por otro lado, con motivo de reducir al mínimo las desviaciones producidas por la flexión del eje (4), se han utilizado llantas con el bombeo necesario para que el plano medio de la rueda (r-t) coincida con el centro del eje (s), en búsqueda de una flexión simétrica en este, que minimice el ángulo de caída de la rueda.

### Método de fuerza

Al principio, se planteó usar el método de fuerza. Para ello, se llevó a cabo una modificación de los apoyos del eje de la rueda, colocando un sensor en el eje que nos permitía observar y registrar los cambios en la fuerza vertical, debidos a resistencia a la rodadura (Figura 3.2). Una vez configurado en paralelo con el software de adquisición de datos original, se realizaron varias pruebas con neumáticos de turismo y de camión, de neumáticos nuevos y recauchutados, pero no se logró alcanzar la precisión necesaria. Alcanzar dicha precisión, requería una reforma de mayor calado en la máquina que no fue posible realizar, por lo que se decidió descartar este método.

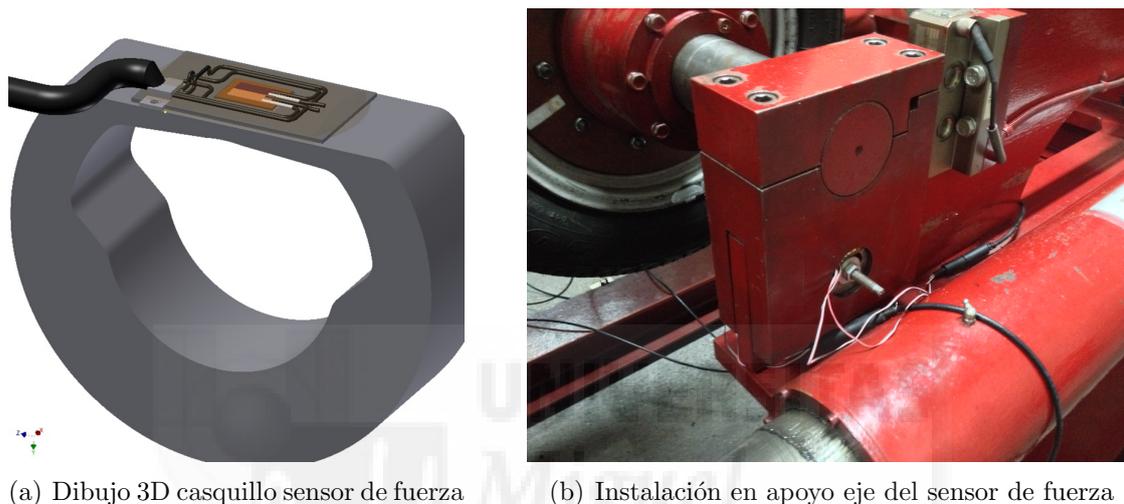


Figura 3.2: Configuración del método de fuerza en banco de ensayos UMH

### Método de par y potencia

Los métodos de par y de potencia tuvieron que ser descartados, ya que la instrumentación necesaria y la adaptación del sistema de medición del banco a estos métodos, superaba las posibilidades de esta investigación.

### Método por deceleración seleccionado

Gracias a la programación original de la máquina, que permite la realización de ensayos con diferentes etapas de carga velocidad, mediante ensayos preconfigurados personalizados, y la posibilidad de desacoplar el motor, ha sido posible desarrollar un método basado en la norma. Tan solo fue preciso, una pequeña adaptación en el banco, para que fuera capaz de mantener el neumático en contacto con el rodillo con unos valores de esfuerzo pequeños.

Cabe señalar, que no se ha tenido la posibilidad de colocar un tacómetro fijo en la rueda para recoger los valores de deceleración del conjunto sin contacto, tal y como se propone en la norma para medir de las pérdidas en el método por deceleración. Por tanto, se tomó la decisión de medir la deceleración de la etapa de pérdidas con el conjunto rodando, es decir,

con la rueda en contacto mínimo sobre el tambor. O lo que sería equivalente, al ensayo “skim test” propuesto en los otros métodos. Es por ello, que no se descontará las pérdidas en los rodamientos a baja carga y se sumarán las pérdidas por histéresis en el caucho debidas a las irregularidades de la superficie del tambor. Esto, podría causar una desviación en los resultados, si comparamos nuestros resultados con otros ensayos realizados según lo especificado en la norma.

Si analizamos estos efectos, al tratarse de un neumático girando en contacto mínimo con el tambor a velocidad constante, las pérdidas en los rodamientos deben ser de un orden bastante inferior al del ensayo con carga (estimados por Hubblau[48] en 0,1 N/kN), y las pérdidas por histéresis, al tratarse de una superficie lisa de acero, serán despreciables en comparación con los valores de resistencia a la rodadura.

Finalmente, para garantizar la resolución de la medida, se realizaron algunas pruebas previas. Para ello, se tomó la medida de deceleración libre del tambor en torno al valor de velocidad de ensayo, para varios neumáticos y se observó, que la resolución era la necesaria.

Por tanto, se ha optado por utilizar una variante del método de deceleración, apoyándose en las recomendaciones descritas en la norma y creando un método específico para el banco de ensayos utilizado, el cuál, será descrito en profundidad más adelante.

### 3.1.3. Análisis y definición del ensayo de pérdidas

Se ha observado que la norma no establece en qué momento se debe realizar el ensayo de pérdidas parásitas. Se han estudiado varias alternativas y analizado la variación de los resultados, buscando que las pérdidas medidas en el ensayo sin carga sean equivalentes a las existentes en el ensayo con carga para la misma velocidad.

En primer lugar, se estudió sobre un neumático de control la realización del ensayo de pérdidas, previo al ensayo de resistencia a la rodadura. Para ello, se recrearon las condiciones habituales de ensayo: temperatura de la sala, presión, fuerza y velocidad de ensayo. Se probaron las siguientes alternativas de ensayo:

- **Directo:** se realizó el ensayo de pérdidas directamente sin etapa de calentamiento.
- **Calentamiento con carga:** tras una etapa de calentamiento con la carga de ensayo, de 3 horas para los ensayos de neumáticos de camión y 30 minutos para los de turismo, se redujo la carga para que hubiese contacto sin deslizamiento y se realizó el ensayo de pérdidas.
- **Calentamiento sin carga:** se realizó el ensayo de pérdidas tras una etapa de calentamiento con la carga mínima para que hubiera contacto sin deslizamiento, de los mismos

tiempos que la prueba anterior.

Tras comparar los resultados de las tres alternativas, se denotó una diferencia entre el ensayo tras una etapa de calentamiento con carga, que dieron un valor de pérdidas apreciablemente inferior al resto. Esto pudo deberse, a que en las otras dos pruebas no se ha alcanzó la estabilización de temperaturas, equivalente a las condiciones del ensayo de resistencia a la rodadura. En base a los resultados obtenidos, se vio que sería conveniente realizar una etapa de calentamiento con carga previa al ensayo de pérdidas, o bien realizar el ensayo de pérdidas a continuación del ensayo de resistencia a la rodadura, que resulta además, la opción más simple.

Se decidió, por tanto, probar distintas formas de realizar el ensayo de pérdidas, pero esta vez, inmediatamente después del ensayo de resistencia a la rodadura. Se probaron, en este caso, las siguientes alternativas de ensayo:

- **Directo:** se realizó la prueba de resistencia a la rodadura (etapa de calentamiento con carga y etapa de deceleración con carga, según la norma) y a continuación, directamente se realizó la prueba de pérdidas.
- **Calentamiento con carga:** se realizó la prueba de resistencia a la rodadura, a continuación, se realizó una etapa de calentamiento con carga de 30 minutos y finalmente, se hizo la prueba de pérdidas.
- **Calentamiento sin carga:** primero, se realizó la prueba de resistencia a la rodadura, a continuación, se realizó una etapa de calentamiento de 30 minutos, pero esta vez con la carga mínima para que hubiera contacto sin deslizamiento y finalmente, se hizo la prueba de pérdidas.

Tras comparar estas alternativas, en el caso de neumáticos de camión no se observaron grandes variaciones entre la curva de deceleración obtenida en el ensayo directo y la obtenida en el ensayo con calentamiento con carga, pero se denotó un pequeño aumento de las pérdidas, tras un calentamiento sin carga. Se atribuye esta diferencia, a que durante el calentamiento sin carga, pudo haberse producido, en realidad, un enfriamiento del neumático y/o el sistema, perdiéndose la estabilidad de temperaturas. Por tanto, se concluyó, que no era necesario hacer de nuevo el calentamiento y en caso de hacerlo, se debía de hacer con carga, porque el calentamiento sin carga enfría el neumático y supone un aumento de las pérdidas, que se refleja como una disminución del CRR obtenido.

Por el contrario, en el caso de neumáticos de turismo, la introducción de la etapa de calentamiento con carga antes de la prueba de pérdidas, hizo bajar sensiblemente el valor de la pérdidas obtenidas (tabla 3.2. Esto, pudo deberse a que durante la etapa de calentamiento previo al ensayo de resistencia a la rodadura establecido en la norma, no se llegó a alcanzar

realmente la estabilización de temperaturas, que siguió aumentando al añadir una nueva etapa de calentamiento intermedia. Por tanto, en este caso, no se debería introducir una etapa de calentamiento con carga antes del ensayo de pérdidas, si lo que se quiere es reproducir las condiciones existentes en el ensayo de resistencia a la rodadura realizado según la norma.

Tabla 3.2: Pérdidas medidas tras el ensayo de resistencia a la rodadura de turismo

CRR a 80 km/h (N/kN)		
Directo	Calentamiento con carga	Calentamiento sin carga
8,867	8,213	8,864

Tras este análisis, se concluyó que tanto en neumáticos de camión como en neumáticos de turismo, la mejor opción era realizar el ensayo de pérdidas inmediatamente después del ensayo de resistencia a la rodadura, sin realizar una etapa de calentamiento previo entre el ensayo de resistencia a la rodadura y el ensayo de pérdidas.

### 3.1.4. Análisis de la reproducibilidad del método

A continuación, con las pruebas de reproducibilidad, se estudió el número de repeticiones del ensayo con carga que hubo que realizar y, además, la necesidad o no de repetir el ensayo de pérdidas.

Para estimar la necesidad de realizar medidas reiteradas, una vez determinado cuando se iba a hacer el ensayo de pérdidas, hubo que estudiar la variabilidad y dispersión de las medidas. Para ello, se realizaron varias pruebas sobre un neumático de control, montado, aclimatado y ensayado en días diferentes, e incluso, varias veces seguidas en un mismo día.

Para analizar la reproducibilidad de la obtención del CRR y el número de repeticiones mínimas necesarias para entra dentro de los valores de desviaciones típicas máximas que marca la norma ISO 28580[40] en el punto 10.3.3, se utilizaron las herramientas estadísticas que ésta nos proporciona en el punto 3.12. En base a esta información, se determinaron el número de repeticiones a realizar en nuestros ensayos. Esta operación, se realizó tanto para neumáticos de turismo (C1) como para los de camión (C3), debido a que el orden de magnitud de los esfuerzos guarda una relación de 1:10, y se puede enmascarar alguna desviación no deseada. Para ambos casos se utilizando la siguiente formulación:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \left( CRR_j - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n CRR_j \right)^2} \quad (3.1)$$

$$n = \left( \frac{\sigma_m}{x} \right)^2 \quad (3.2)$$

Donde,

$\sigma_m$ , es la desviación típica de la medida del conjunto de repeticiones.

$j$ , es un número de 1 a  $n$  repeticiones de cada medición para un neumático determinado.

$n$ , es el número de repeticiones de las mediciones de cada neumático ( $n \geq 3$ ).

$x$ , es la desviación típica objetivo:

- 0,075 N/kN para neumáticos de turismo (Clase C1 y C2,  $LI \leq 121$ ).
- 0,060 N/kN para neumáticos de camión (Clase C3,  $LI > 121$ ).

### Neumáticos de turismo clase C1

En los neumáticos de turismo se encontraron algunas dificultades para ser repetibles, realizando un solo ensayo. Según podemos ver en la tabla resumen 3.3, al repetir un número mínimo de 3 veces y obtener el CRR para esos ensayos, se pudo observar que la desviación típica de los resultados parecían estar por encima de los 0,075 N/kN que marca la norma, lo que suponía, obteniendo el número mínimo de repeticiones necesarias para reducir esta desviación, la necesidad de realizar un número mínimo de 4 repeticiones.

Tabla 3.3: Pruebas reproducibilidad C1 (1 de 3)

<b>UNA REPETICIÓN EN 3 DÍAS DIFERENTES</b>		
Referencia de muestra	Nº de día	CRR
UMH12EN086	1	8,684
	2	8,479
	3	8,411
PROMEDIO		<b>8,525</b>
DESVIACIÓN TÍPICA		<b>0,142</b>
NÚMERO MÍNIMO DE ENSAYOS		<b>3,595</b>

Como este valor suponía un incremento considerable en el tiempo necesario para realizar el total de los ensayos, se consideró la opción de realizar 3 ensayos uno detrás de otro, intercalando el ensayo de pérdidas y volviendo a realizar una etapa de calentamiento más corto, de acuerdo con el punto 10.3.3 de la norma, pero sin desmontar el conjunto de la máquina. Resumido en la tabla 3.4, podemos observar que, en este caso, la desviación disminuyó considerablemente, siendo esta inferior a los 0,075 N/kN que marca la norma.

No obstante, esta modalidad no es del todo fiel a la norma, ya que no tiene en cuenta las posibles desviaciones proporcionadas por las operaciones de montaje y desmontaje del neumático en la máquina. Pero, al jugar a favor de la reproducibilidad, se propone quedarnos con el valor medio de las tres repeticiones consecutivas como resultado del ensayo de resistencia a la rodadura. Con estas condiciones, se decidió verificar si la desviación era la adecuada

Tabla 3.4: Pruebas reproducibilidad C1 (2 de 3)

<b>3 REPETICIONES EN 1 DÍA</b>		
Referencia de muestra	Nº de repeticiones	CRR
UMH12EN086	1	8,407
	2	8,473
	3	8,503
PROMEDIO		<b>8,461</b>
DESVIACIÓN TÍPICA		<b>0,049</b>
NÚMERO MÍNIMO DE ENSAYOS		<b>0,422</b>

realizando esta misma modalidad de ensayo en tres días diferentes y comparando las medias de las tres repeticiones. En este tercer caso, se hicieron pruebas sobre dos neumáticos de control y viendo el resumen de resultados en la tabla 3.5, se puede observar que la desviación disminuyó considerablemente, siendo esta inferior a los 0,075 N/kN que marca la norma. Por tanto, se consideró adecuado realizar todos los ensayos de turismo, con esta modalidad de ensayo.

Tabla 3.5: Pruebas reproducibilidad C1 (3 de 3)

<b>3 REPETICIONES EN 3 DÍAS DIFERENTES</b>						
Referencia de muestra	Nº de repetición / nº día	Rep1	Rep2	Rep3	Promedio	Desviación
UMH12EN086	1er día	8,416	8,417	8,333	8,389	0,049
	2º día	8,407	8,473	8,503	8,461	0,049
	3er día	8,292	8,256	8,402	8,317	0,076
PROMEDIO					<b>8,389</b>	
DESVIACIÓN TÍPICA					<b>0,072</b>	
NÚMERO MÍNIMO DE ENSAYOS					<b>0,929</b>	
UMH16EN063	1er día	6,335	6,295	6,035	6,222	0,163
	2º día	6,358	6,407	6,195	6,320	0,111
	3er día	6,100	6,350	6,353	6,268	0,145
PROMEDIO					<b>6,270</b>	
DESVIACIÓN TÍPICA					<b>0,049</b>	
NÚMERO MÍNIMO DE ENSAYOS					<b>0,427</b>	

Como refuerzo a esta comprobación, se ha ampliado el análisis mediante una prueba “ANalysis Of VAriance” (ANOVA) para las tres repeticiones. Previo al ANOVA, deberemos asegurarnos que la distribución de datos se aproxima a una distribución normal y que existe homogeneidad entre las varianzas de las poblaciones comparadas. Para comprobar el ajuste con una distribución normal, se somete todos los valores a un contraste de hipótesis mediante el estadístico W de Shapiro-Wilk. Para validar la homogeneidad de las varianzas, la prueba ANOVA utiliza el estadístico de F de Levene. Como podemos observar en la tabla 3.6, el grado de significación está a favor de ambas hipótesis. Por otro lado, la significación ANOVA al ser mayor que 0,05, nos indica que debemos aceptar la hipótesis nula de igualdad de las medias de las poblaciones de las tres repeticiones analizadas. Por tanto, podemos considerar que las medidas de las tres repeticiones tienen su valor tan próximo al valor medio que no

se puede distinguir y por consecuencia, las podremos considerar como parte de una misma población. Por tanto, queda reforzada la consideración de tomar la media de las tres mediciones como resultado del CRR del neumático ensayado. Podemos encontrar más información sobre este y otros análisis estadísticos en el anexo C.

Tabla 3.6: ANOVA pruebas reproducibilidad C1

PRUEBA	Kolmogorov-Smirnov		Levene		ANOVA	
	Z	Significación	F	Significación	F	Significación
UMH12EN086	0,230	0,186	0,552	0,618	4,475	0,065
UMH16EN063	0,247	0,120	1,271	0,347	0,362	0,711

### Neumáticos de camión clase C3

En cuanto a los neumáticos de camión, se realizaron algunas pruebas para determinar si el resultado era repetible realizando un solo ensayo, lo que permitía a su vez, reducir los tiempos de ensayo. En primer lugar, como podemos ver en la tabla resumen 3.7, se repitió el ensayo completo, incluyendo el ensayo de pérdidas en 3 días distintos. En base a estos resultados, se pudo observar que la desviación típica estaba por encima de los 0,06 N/kN que marca la norma, lo que suponía, obteniendo el número mínimo de repeticiones necesarias para reducir esta desviación, la necesidad de haber realizado un número mínimo de 3 repeticiones, y haber asumido una desviación típica, de por lo menos 0,09 N/kN, lo que se consideró inviable.

Tabla 3.7: Pruebas reproducibilidad C3 (1 de 3)

UNA REPETICIÓN EN 3 DÍAS DIFERENTES		
Referencia de muestra	Nº de día	CRR
UMH15EN035	1	7,168
	2	7,062
	3	6,995
PROMEDIO		<b>7,075</b>
DESVIACIÓN TÍPICA		<b>0,087</b>
NÚMERO MÍNIMO DE ENSAYOS		<b>2,111</b>

De igual modo que en los neumáticos de turismo, se consideró la opción de realizar 3 ensayos consecutivos, pero realizando un solo ensayo de pérdidas tras la tercera repetición y una etapa de calentamiento más corto entre la primera y la segunda, y la segunda y la tercera repetición. Esta consideración de calentamiento entre etapas de ensayo de resistencia a la rodadura, esta de acuerdo con el punto 10.3.3 de la norma, pero con la diferencia de que no consideró desmontar el conjunto de la máquina. Pero, al igual que en el caso de neumáticos de turismo, esta consideración, juega a favor de la reproducibilidad del método. En éste segundo intento, resumido en la tabla 3.4, podemos observar que la desviación disminuyó considerablemente, siendo esta inferior a los 0,06 N/kN que marca la norma.

Tabla 3.8: Pruebas reproducibilidad C3 (2 de 3)

<b>3 REPETICIONES EN 1 DÍA</b>		
Referencia de muestra	Nº de repeticiones	CRR
UMH15EN035	1	7,168
	2	7,225
	3	7,229
PROMEDIO		<b>7,207</b>
DESVIACIÓN TÍPICA		<b>0,034</b>
NÚMERO MÍNIMO DE ENSAYOS		<b>0,320</b>

Esta modalidad tampoco es del todo fiel a la norma, ya que las pérdidas se obtenían una única vez al final del ensayo, lo que podía variar de algún modo la dispersión del resultado. Debido a esto, se decidió realizar esta misma secuencia de 3 ensayos consecutivos, realizando un ensayo de pérdidas tras cada repetición. Se verificó entonces, si la desviación era la adecuada, realizando ambas modalidades de ensayo en tres días diferentes y comparando las medias de las tres repeticiones. En ambas modalidades, se proponía quedarnos con el valor medio de las tres repeticiones como resultado de la resistencia a la rodadura.

En esta tercera prueba, viendo el resumen de resultados en la tabla 3.5, podemos observar que la desviación disminuyó considerablemente, siendo esta inferior a los 0,06 N/kN que marca la norma para ambos casos. Se aprecia además que las desviaciones de los dos métodos difieren en menos de un 0.5% y que por tanto, la variación del resultado de un método a otro se consideró poco significativo.

Tabla 3.9: Pruebas reproducibilidad C3 (3 de 3)

<b>3 REPETICIONES EN 3 DÍAS DIFERENTES CON UN ENSAYO DE PERDIDAS</b>						
Referencia de muestra	Nº de repetición / nº día	Rep1	Rep2	Rep3	Promedio	Desviación
UMH15EN035	1er día	7,182	7,242	7,249	7,222	0,034
	2º día	7,077	7,183	7,218	7,160	0,073
	3er día	7,014	7,198	7,190	7,134	0,104
PROMEDIO					<b>7,172</b>	
DESVIACIÓN TÍPICA					<b>0,045</b>	
NÚMERO MÍNIMO DE ENSAYOS					<b>0,569</b>	
<b>3 REPETICIONES EN 3 DÍAS DIFERENTES CON 3 ENSAYOS DE PERDIDAS</b>						
Referencia de muestra	Nº de repetición / nº día	Rep1	Rep2	Rep3	Promedio	Desviación
UMH15EN035	1er día	7,168	7,225	7,229	7,207	<b>0,034</b>
	2º día	7,062	7,169	7,201	7,144	<b>0,073</b>
	3er día	6,995	7,190	7,173	7,119	<b>0,108</b>
PROMEDIO					<b>7,157</b>	
DESVIACIÓN TÍPICA					<b>0,045</b>	
NÚMERO MÍNIMO DE ENSAYOS					<b>0,572</b>	

Como refuerzo a esta comprobación, de modo equivalente a las pruebas de turismo, se ha ampliado el análisis mediante una prueba ANOVA para las tres repeticiones en ambas modalidades, pudiendo observar en la tabla 3.10 que el grado de significación está a favor de

ambas. Podemos encontrar más información sobre este y otros análisis estadísticos en el anexo C.

Tabla 3.10: ANOVA pruebas previas C3

PRUEBA		Kolmogorov-Smirnov		Levene		ANOVA	
Nº ensayos pérdidas	Referencia muestra	Z	Significación	F	Significación	F	Significación
1	UMH15EN035	0,349	0,002	3,427	0,102	0,855	0,471
3	UMH15EN035	0,335	0,004	3,134	0,117	1,028	0,413

### Conclusión de la reproducibilidad

En conclusión, tras haberse analizado la reproducibilidad para la obtención del CRR y el número de repeticiones mínimas necesarias para conseguirlo, se ha llegado a la conclusión de que no era necesario realizar más de un ensayo sobre cada neumático para obtener el valor del CRR buscado, con la particularidad de que el ensayo debe realizarse tres veces consecutivas y tomando como resultado del ensayo el valor medio de las tres repeticiones, con una etapa de ensayos de pérdidas después de cada repetición. Además, con la opción en el caso de neumáticos de camión, de realizar la fase de pérdidas al final del ensayo, lo que podría suponer alguna reducción de los tiempos de ensayo.

### 3.1.5. Análisis de la incertidumbre del método

Para controlar la variabilidad de los resultados lo máximo posible, se ha analizado la incertidumbre asociada a los equipos y al procesado de los datos. Análisis de incertidumbre, que se ha desarrollado con mayor extensión en el anexo B.

En el análisis que en el anexo B se desarrolla, se ha expuesto la ecuación del CRR con todos sus términos desglosados y las agrupaciones que se han realizado, así como una tabla resumen de variables que intervienen, su descripción y unidades. Además, se expone una tabla resumen de todas las incertidumbres asociadas a los equipos de medidas y el cálculo de la incertidumbre típicas para cada variable intervenida, así como+ la incertidumbre total del procesado de datos debido a los equipos. Finalmente se hará una relación de otras fuentes de incertidumbre que podemos hallar.

De los resultados de incertidumbre obtenidos podemos decir que, los valores de incertidumbre típica asociada al procesado de datos de turismo y de camión, para el cálculo del CRR han sido los siguientes:

$$\text{Turismo: } u_c(\text{CRR}) = 0,10N/kN$$

$$\text{Camión: } u_c(\text{CRR}) = 0,05N/kN$$

De la relación de otras fuentes de incertidumbre, como las inexactitudes en el montaje o

la presión de inflado aplicado, podemos decir que se han tenido en cuenta para establecer una definición detallada del procedimiento de ensayo que permita tener contenidas dichas fuentes.

Finalmente, se ha demostrado la precisión del método de medición del CRR, lo que nos permite realizar comparaciones entre resultados obtenidos con el banco de ensayos usado, los equipos de medición utilizados y el método desarrollado.

### 3.1.6. Medidas termográficas

Como información adicional sobre el comportamiento de los neumáticos, se ha considerado interesante la medida de la temperatura superficial durante la etapa de calentamiento y en concreto, en el instante final de dicha etapa. Etapa en la cual, se deben haber alcanzado las condiciones de equilibrio y de homogeneidad de temperatura. Para ello se ha utilizado una cámara termográfica TESTO 875-1, que a su vez ha sido ajustada con un termopar de contacto PHYWE 07140, cinta adhesiva de emisividad y un radiador Lambert improvisado de papel de aluminio arrugado y alisado.

Se ha orientado la cámara, en los neumáticos de camión, en la dirección paralela al eje de giro y enfocada sobre la parte superior del flaco en la zona de contacto con el rodillo durante el ensayo. En los neumáticos de turismo se ha orientado en la dirección perpendicular al eje de giro, sobre el plano medio del neumático y del tambor y enfocada sobre la banda en la zona de contacto con el rodillo durante el ensayo.

#### Determinación y ajuste de la emisividad

La emisividad describe la capacidad de una superficie para emitir radiación infrarroja. Si ésta no se conoce, no se puede medir correctamente con una cámara termográfica. Para determinar la emisividad de la superficie del objeto medido existen varias alternativas; a continuación, se expondrán tres de las más habituales:

1. Basarse en una tabla de emisividad como la de la tabla 3.11. Se debe tener en cuenta, que estos valores tan solo sirven para un ajuste aproximado de la emisividad, que puede ser valido para comparar por diferencias, pero no para saber el valor absoluto de la medida, para lo que tendremos que utilizar una de las dos formas siguientes. Inicialmente se programó la cámara con una emisividad 0,94 que equivale a la goma dura.
2. Medición comparativa con un termómetro de contacto. Se midió primero con un termómetro de contacto la temperatura de la superficie del neumático y posteriormente con la cámara termográfica. La emisividad se debe ajustar gradualmente hasta que la temperatura detectada por la cámara corresponda con la del termómetro de contacto. Como

podemos ver en las imágenes de la figura 3.3, en este caso para igualar la temperatura captada por la cámara a los valores del termopar se ha ajustado la emisividad a 0,93.

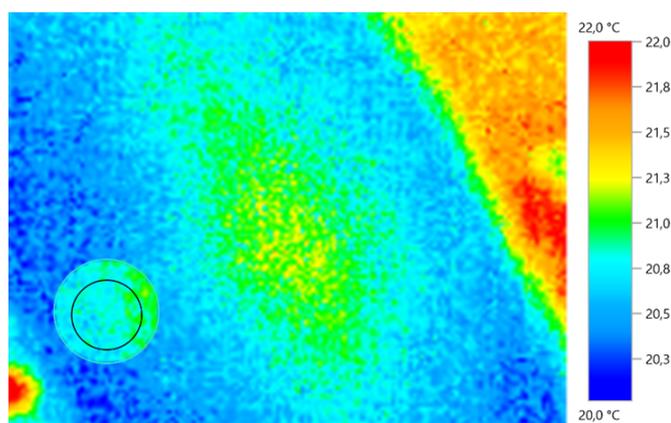
- Medición comparativa con la cámara termográfica. Se utilizó un trozo de cinta adhesiva de emisividad ( $e=0.95$ ) pegada al flanco del neumático. Tras un periodo de estabilización de la temperatura podemos medir apuntando a la cinta. Este valor sirve como temperatura de referencia y haciendo uso del programa de posprocesado de imágenes térmicas de la marca ajustamos la emisividad hasta que la cámara mostró la misma temperatura en una zona sin cinta que en una zona con la cinta adhesiva. En este caso la temperatura medida directamente con la cámara, como la temperatura registrada en la imagen térmica, coinciden y se ha ajustado la emisividad a 0,93 para que coincida con el resto de la zona de caucho del neumático. Figura 3.4.

Tabla 3.11: Tabla de emisividad

Material (temperatura del material)	Emisividad	Material (temperatura del material)	Emisividad
Acero laminado en frío (93 °C)	0,75–0,85	Hielo liso (0 °C)	0,97
Acero oxidado (200 °C)	0,79	Hierro con costra de fundición (100 °C)	0,8
Acero superficie tratada térmicamente (200 °C)	0,52	Hierro con costra de laminación (20 °C)	0,77
Algodón (20 °C)	0,77	Hierro de fundición oxidado (200 °C)	0,64
Aluminio laminado sin tratamiento (170 °C)	0,04	Hierro, esmerilado (20 °C)	0,24
Aluminio muy pulido (100 °C)	0,09	Hormigón (25 °C)	0,93
Aluminio, muy oxidado (93 °C)	0,2	Ladrillo, mortero, revoque (20 °C)	0,93
Aluminio, no oxidado (100 °C)	0,03	Latón oxidado (200 °C)	0,61
Aluminio, no oxidado (25 °C)	0,02	Papel (20 °C)	0,97
Arcilla (70 °C)	0,91	Piedra arenisca o gres (40 °C)	0,67
Caucho, blando, gris (23 °C)	0,89	Pintura azul sobre lámina de aluminio (40 °C)	0,78
Cinc oxidado	0,1	Pintura blanca (90 °C)	0,95
Cobre ligeramente deslustrado (20 °C)	0,04	Pintura de transformadores (70 °C)	0,94
Cobre oxidado (130 °C)	0,76	Pintura negra mate (80 °C)	0,97
Cobre, laminado (40 °C)	0,64	Pintura, amarilla, 2 capas sobre lámina de aluminio (40 °C)	0,79
Cobre, pulido (40 °C)	0,03	Pinturas al óleo (cualquier color) (90 °C)	0,92–0,96
Corcho (20 °C)	0,7	Plásticos: PE, PP, PVC (20 °C)	0,94
Cristal (90 °C)	0,94	Plomo (40 °C)	0,43
Cromo (40 °C)	0,08	Plomo oxidado (40 °C)	0,43
Cromo pulido (150 °C)	0,06	Plomo, gris oxidado (40 °C)	0,28
Cuerpo refrigerante anodizado negro (50 °C)	0,98	Porcelana (20 °C)	0,92
Goma dura (23 °C)	0,94	Yeso (20 °C)	0,9
Granito (20 °C)	0,45		
Madera (70 °C)	0,94		
Mampostería (40 °C)	0,93		
Mármol blanco (40 °C)	0,95		



(a) Medida con termopar



(b) Posprocesado imagen térmica

Figura 3.3: Comparación de la emisividad con termopar

En conclusión, se ha comprobado que la emisividad escogida de la tabla 3.11 (0,94), no difiere en gran medida de la obtenida del ajuste con el termopar, ni con la medida con la cámara termográfica, ni con la medida con la cinta de emisividad (0,93). Por tanto, se decide ajustar la emisividad de todas las pruebas térmicas realizadas a 0,94.

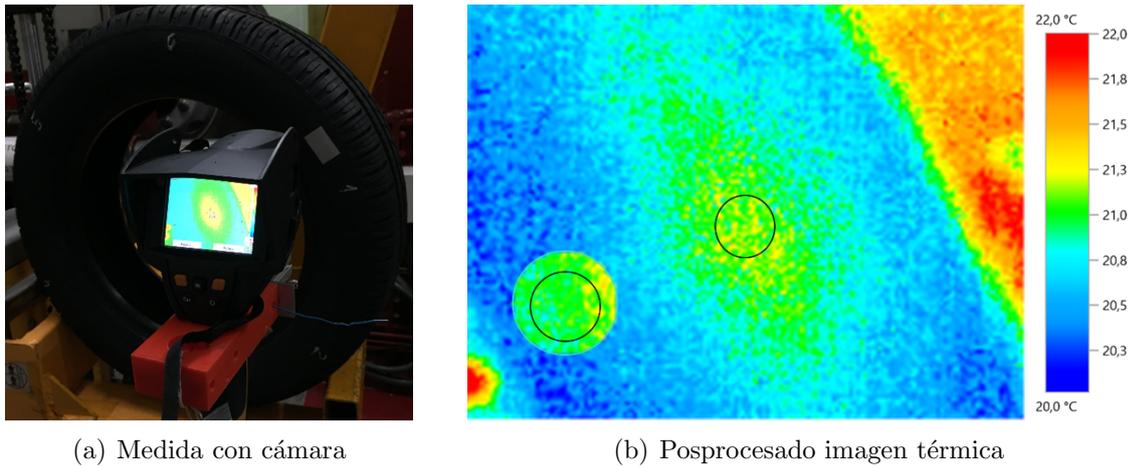


Figura 3.4: Comparación de la emisividad con cámara termográfica

### Determinación y ajuste de la temperatura de radiación reflejada

Para determinar la temperatura radiada por algún elemento externo al neumático deberíamos utilizar un radiador Lambert. Se trata de un objeto que refleja la radiación incidente con la difusión óptima, es decir, con la misma intensidad en todas direcciones. Una forma improvisada de radiador para medir esta temperatura se puede conseguir con una lámina de aluminio arrugada y alisada de nuevo. La forma de ajuste de la emisividad reflejada, es situando esta lámina cerca o sobre el objeto a medir. A continuación, se mide con la cámara termográfica la temperatura de la lámina con la emisividad ajustada a uno, como se muestra en la figura 3.5. La temperatura medida estará bastante cerca de la temperatura real reflejada por lo que el valor emitido se debe ajustar en la cámara para poder obtener valores de medición correctos.

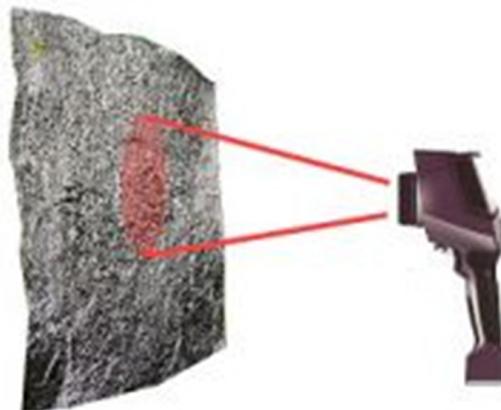


Figura 3.5: Ejemplo de radiador Lambert

La temperatura reflejada tiene una influencia considerable en la medición, sobre todo cuando se miden objetos con una emisividad muy baja, no es el caso. En muchos casos, la temperatura reflejada es idéntica a la temperatura ambiente.

En nuestro caso no hay fuentes de calor que puedan radiar sobre la superficie del neumático, y tampoco hay elementos de otros materiales que puedan reflejar la temperatura del propio

neumático. Por tanto, como la temperatura ideal de ensayo son  $25^{\circ}\text{C}$  y se ha establecido una climatización para que en la toma de datos se mantenga a un metro del neumático a esta temperatura, se ha considerado que la temperatura por radiación reflejada es igual a la temperatura ambiente, estableciéndola en  $25^{\circ}\text{C}$ .

### Selección de la zona de medición

Por un lado, se realizaron una serie de pruebas previas sobre neumáticos de clase C3, donde se tomaron capturas termográfica con el objetivo de la cámara perpendicular al flanco del neumático. De estas medidas se esperaba obtener información relacionada con las pérdidas por histéresis en la zona de contacto con el tambor y sus alrededores, así como analizar la temperatura medida en el talón, y de esta manera, ver la relación de la temperatura con el CRR. Tras estos ensayos se observó que la temperatura del talón no parecía proporcionar información relevante a la variación del CRR. Por el contrario, la temperatura del hombro sí que parece reflejar cierta consonancia con la variación del CRR entre los neumáticos probados. Probablemente, por ser una de las zonas donde se suele concentrar más material y donde se producen mayores pérdidas. Debido a esto, se decidió realizar la captura termográfica de esta manera en todos los ensayos sobre las muestras de camión.

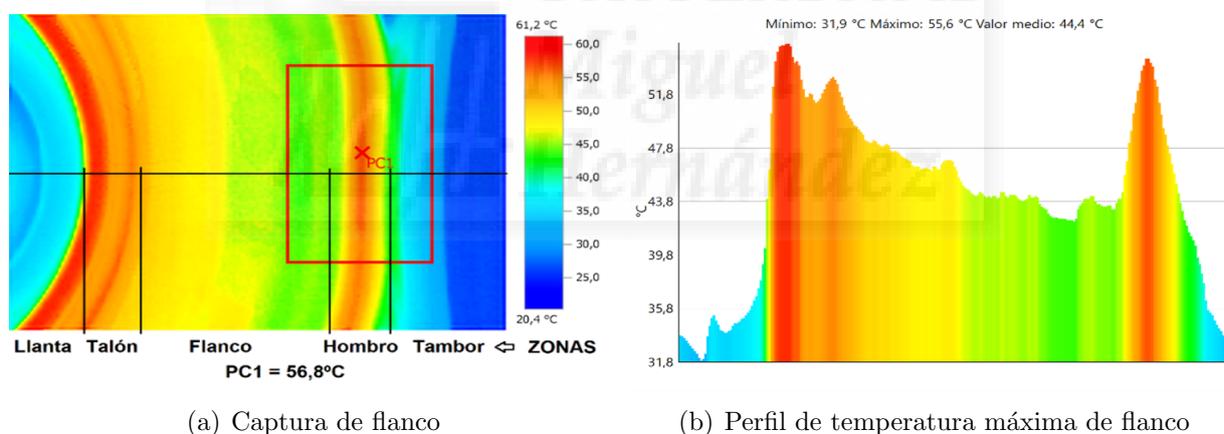


Figura 3.6: Ejemplo termografía de neumático C3

Por otro lado, se hicieron las mismas pruebas sobre neumáticos de clase C1 y en este caso, no se pudo observar con claridad este efecto, además de observarse que la temperatura en el hombro parecía no reflejar la temperatura máxima de la zona de contacto, quizás debido a que para estos neumáticos el material en los hombros es menor que en los de camión. En vista a estos resultados se investigó que habían realizado otros autores, y se observó que algunos de ellos, [69], decidieron realizar las medidas de temperatura en el fondo de las ranuras de la banda, como reflejo de la temperatura máxima del neumático. En consecuencia, se realizaron algunas mediciones sobre la banda de rodadura con el eje del objetivo paralelo a la normal del plano tangente de la superficie del neumático y, en efecto, se observó una mayor variación de temperatura con las muestras probadas y una temperatura máxima medida en el fondo de las ranuras de la banda superior a las medidas en el flanco. Por tanto, se decidió registrar

las imágenes termográficas de la temperatura de la banda en todos los neumáticos ensayadas de turismo.

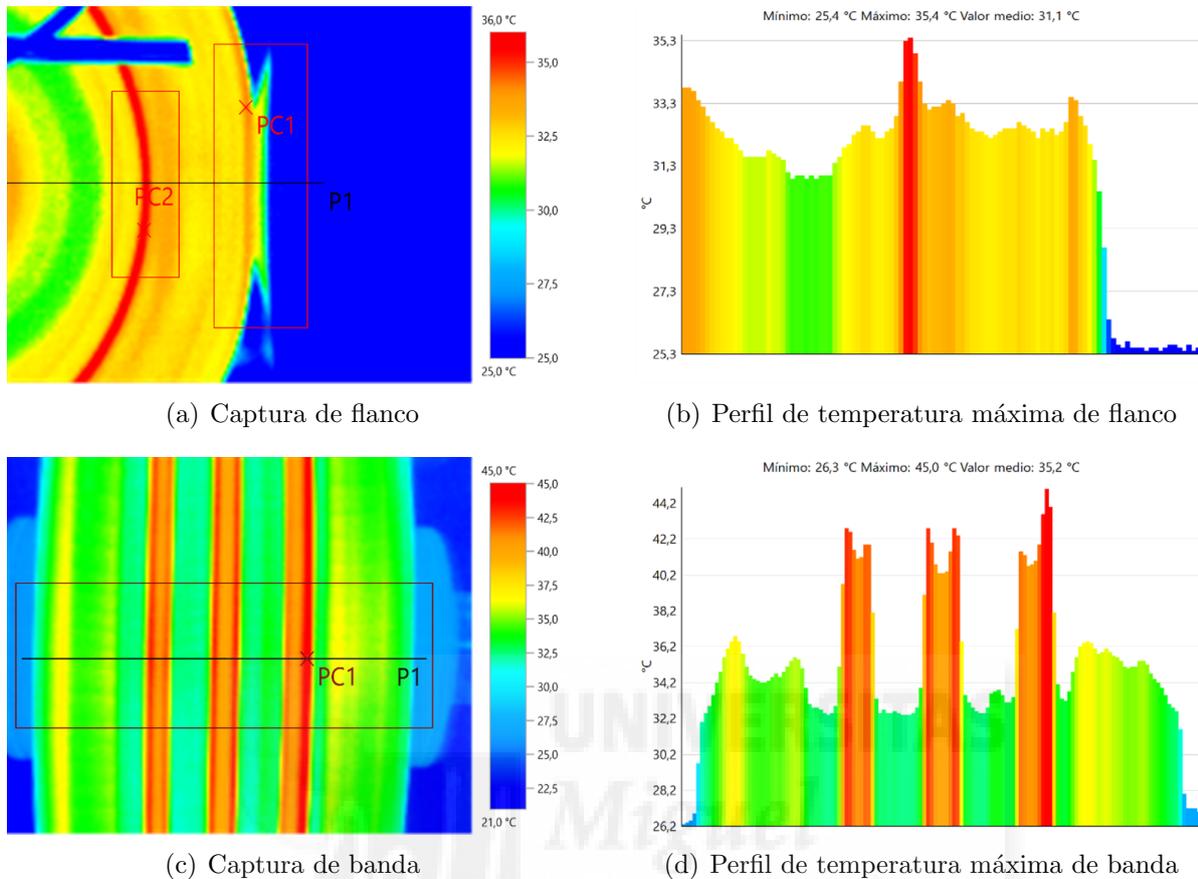


Figura 3.7: Ejemplo termografía de neumático C1

Por cada neumático, se va a capturar una imagen térmica al final del calentamiento de cada repetición. En cada imagen se determinará el valor máximo de temperatura y con estas tres medidas, se calculará un valor promedio de temperatura, como valor representativo del neumático.

### 3.1.7. Definición detallada del procedimiento de ensayo

Teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente, vamos a describir con detalle cuál ha sido la metodología de ensayo establecida para los ensayos que se van a realizar.

Cabe destacar, que este procedimiento se ha plasmado en el desarrollo de un formato de adquisición de datos por cada muestra, que servirá a su vez como informe de ensayo y de recopilación de resultados. Debido a la extensión de las hojas de ensayo, estas no serán adjuntadas. A cambio, en el anexo A se mostrarán todas las tablas de relación de muestras, mediciones y resultados analizados, donde podremos ver con detalle toda la información recopilada.

### Preparación de los neumáticos

Siempre que preparemos una muestra para ensayar hemos seguido el siguiente proceso:

1. Identificación de la muestra. Los neumáticos se codificarán de la forma habitual establecida en el procedimiento de ensayos del laboratorio. Todos los neumáticos que entran en él serán identificados con un código de registro, por ejemplo: UMH15EN032, donde el primer grupo de números identifica el año de alta en el sistema y el segundo el número de expediente (en este caso, expediente 32 del año 2015).
2. Inspección inicial. Los neumáticos pasarán primero por una inspección visual donde, en el caso de detectar alguna anomalía, esta será anotada en el informe de ensayo.
3. Montaje llanta neumático. Los neumáticos requieren ser montados y equilibrados en su llanta de ensayo. En nuestro caso, siendo neumáticos europeos, se utilizarán las llantas recomendadas por ETRTO [15]. Todos los neumáticos C1 se montarán sobre la misma llanta de medidas 6,5Jx15" y todos los neumáticos C3 serán montados sobre dos únicas llantas de medidas 9x22,5". Se ha determinado, además, cambiar la válvula en cada montaje.
4. Equilibrado. Para el equilibrado se determinó que fuera realizado siempre por la misma persona, utilizando las herramientas de las que dispone el puesto de montaje y las contrapesas apropiados para los neumáticos montados.
5. Montaje en eje de ensayo. Los conjuntos llanta-neumático, o rueda, serán montados siempre sobre los mismos ejes de ensayo, uno para turismo y otro para camión. Para este fin, se utilizará la tornillería y herramienta específica para llevar a cabo este montaje. Se montará siempre todo el patrón de tornillos con el mismo número de tornillos, arandelas y tuercas.
6. Acondicionamiento. Se ajustará la presión del neumático según establece la norma: 210 kPa para neumáticos C1 y la presión máxima marcada en el flanco para C3. A continuación, se dejará el conjunto en reposo sobre un soporte en alto sin contacto con el suelo y dentro de la sala de ensayo un mínimo de 12 h, con el objetivo de homogeneizar las propiedades de los materiales. Una vez pasado este tiempo, se verificará y ajustará la presión a los valores mencionados, si fuera necesario. En el caso de no mantener una presión en torno a 1 kPa alrededor de los valores establecidos, se descartará el montaje.

### Toma de medidas previas

Con el eje en su soporte y el conjunto acondicionado, se realizarán las medidas dimensionales iniciales siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Identificación de los puntos de medida. Se identificará con un rotulador 6 puntos perime-

trales uniformemente distribuido sobre el neumático y con una marca la zona perimetral más próxima al plano medio del neumático.

2. Medición del ancho máximo del neumático. La medida será realizada en los 6 puntos perimetrales marcados, con un pie de rey grande (referencia interna EL-035) que posee 750 mm de apertura máxima.
3. Medición de la profundidad del dibujo. En los neumáticos C1 se medirá la profundidad del dibujo en el punto 1, con un pie de rey de longitud de escala 150 mm (referencia interna EL-065). La profundidad del dibujo en los neumáticos raspado se tomará como cero en ambos casos. Cabe diferenciar este dato con los valores de profundidad de banda mostrada en los resultados del anexo A, ya que este último, será obtenido por diferencia de radios exteriores entre el neumático nuevo y el mismo neumático raspado.
4. Medición del perímetro máximo. Se medirá el perímetro máximo del neumático con una cinta métrica de clase II (referencia interna EL-047).
5. Medición de la inercia. Debido a las dificultades de aplicación práctica de los métodos propuestos por la norma, se ha decidido usar un método propio de ensayo de inercia que será explicado a continuación. Con un hilo trenzado de acero enganchado por un extremo al eje del neumático y por el otro a un peso conocido, se enrollará el cable alrededor del eje hasta sustentar la masa a una altura conocida. En esta posición inicial, se dejará caer libremente la masa hasta llegar al suelo. Se registrarán los tiempos de caída del peso (desde el momento en que se libera la masa hasta que toca suelo) y de parada del neumático (desde que toca suelo la masa hasta que el conjunto dejar de rodar). Se realizará este procedimiento 10 veces por cada neumático y se obtendrá un valor medio de inercia por cada uno.

Con los registros de tiempo de la prueba de inercia, suponiendo que la masa al caer en la primera parte del ensayo describe un Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado (MRUA), podremos obtener la aceleración con la que la masa llega al suelo. Esta aceleración coincidirá con la aceleración de inicio de la segunda parte. La segunda parte, que dura hasta que se para el neumático, servirá para descontar las posibles pérdidas aerodinámicas y por fricción en los rodamientos. Con ambas aceleraciones e igualando las inercias en ambos ensayos, podremos obtener el par aplicado al final de la primera etapa, y con ello, calcular la inercia del conjunto rotatorio del eje, como el incremento de momento angular, dividido por la aceleración angular. La ecuación (3.3), muestra la fórmula de la inercia del conjunto ya desarrollada, que se ha utilizado para la realización de los cálculos.

$$I_T = \frac{P_e \cdot r_{P_e}^2 \cdot t_1^2 \cdot t_2}{2X_f (t_1 + t_2)} \quad (3.3)$$

Donde,

$I_T$ , es la inercia del neumático, en  $kg \cdot m^2$ .

$P_e$ , es peso del ensayo de inercia, en N.

$r_{P_e}$ , es el radio de aplicación de peso de inercia, en m.

$t_1$ , es el tiempo de caída libre del peso de ensayo de inercia, en s.

$t_2$ , es el tiempo hasta parada del neumático ensayo inercia, en s.

$X_f$ , es la distancia recorrida por el peso del ensayo de inercia, en m.

### Montaje del conjunto eje-rueda en el banco

El montaje del conjunto en el banco de ensayo, figura 3.1, requiere de unas operaciones específicas para reducir los desalineamientos, que serán descritas a continuación:

1. Puesto de montaje. La máquina de ensayo tiene dos puestos de montaje. Para evitar posibles desviaciones debidas al banco de ensayo se decidió reservar el puesto 2 para realizar todos los ensayos de este estudio.
2. Colocación del eje. Con ayuda de un elevador, se colocará el conjunto apoyado en las bielas del carro (7) y se montarán las abrazaderas del eje (8) atornilladas, pero sin apretar.
3. Alineación y fijación del eje. A continuación, se aproximará el carro (3) al tambor (1), accionando el pistón hidráulico (6) con una fuerza aproximada de entre 80-100 daN para, finalmente, apretar los tornillos con el sistema en carga.

### Toma de medidas intermedias

Se realizarán dos tipos de medidas intermedias, una antes de iniciar el ensayo y otras durante el ensayo:

1. Radio bajo carga. Tras la etapa de calentamiento del neumático previa al ensayo de resistencia a la rodadura se tomará medida indirecta del radio bajo carga dinámico con el pie de rey grande (referencia interna EL-035).
2. Medidas termográficas. Se realizarán 3 medidas termográficas cada una de ellas al final de cada una de las etapas de calentamiento (cámara termográfica TESTO 875-1).

### Determinación de la inercia del tambor de ensayo

La medida del valor de inercia del tambor se ha determinado de modo gráfico con los archivos gráficos de diseño de la máquina y los planos finales de fabricación. A esta inercia se le va a combinar la inercia de los elementos rodantes del motor, obtenidos del catálogo del fabricante, y la inercia debida a los elementos de transmisión. Tomando como constantes la relación de transmisión, la inercia del motor y la inercia de la polea de salida del motor, obtendremos una inercia reducida en el tambor que sea la utilizada en todos los ensayos.

$$\frac{1}{2} \cdot I_{RD} \cdot \omega_D^2 = \frac{1}{2} \cdot I_D \cdot \omega_D^2 + \frac{1}{2} \cdot I_M \cdot \omega_M^2 + \frac{1}{2} \cdot I_P \cdot \omega_M^2 \quad (3.4)$$

$$I_{RD} = I_D + (I_M + I_P) \cdot i^2 \quad (3.5)$$

$$I_{RD} = 625 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.6)$$

Donde,

$I_{RD}$ , es la inercia reducida del tambor de ensayo, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

$I_D$ , es la inercia del tambor de ensayo, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

$I_M$ , es la inercia del motor a la salida, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

$I_P$ , es la inercia de la polea de salida, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

$\omega_D$ , es la velocidad angular del tambor, en rad/s.

$\omega_M$ , es la velocidad angular en la salida del motor, en rad/s.

$i$ , es la relación de transmisión  $\left(\frac{\omega_M}{\omega_D}\right)$ , su.

$m_R$ , es la masa del tambor de ensayos, en kg.

$R$ , es el radio del tambor de ensayos, en m.

### Ensayo en banco

El ensayo comenzará con una etapa de calentamiento con carga y velocidad constantes. Después se realizará una etapa de deceleración libre manteniendo el neumático en contacto con el tambor, sin variar la carga. Para esta etapa, se aumentará ligeramente la velocidad de ensayo por encima del valor de cálculo y se dejará rodar libremente hasta un valor por debajo del mismo valor. A continuación, se realizará la prueba de pérdidas como otra etapa de deceleración, pero esta vez reduciendo la carga de ensayo para que aparezca un contacto

mínimo sin deslizamiento entre el tambor y el neumático.

Atendiendo a las pruebas previas realizadas, que determinaron la necesidad de realizar varias repeticiones para cumplir con las desviaciones típicas de la norma, se repitió 3 veces esta secuencia, con la diferencia de que el calentamiento de las dos últimas partes, llamados calentamientos intermedios, se redujo en el tiempo que recomienda la norma en el punto 10.3.3. Además, como conclusión de las pruebas previas en relación con la parte del ensayo de pérdidas, se determina realizar el ensayo de pérdidas en neumáticos C1 a continuación de cada repetición del ensayo en carga, y para neumáticos C3 solo a continuación de la tercera repetición.

Como podemos ver en las tablas 3.12 y 3.13, los valores de carga, velocidad y tiempo difieren para la clase de neumático, según sean de turismo o camión. Para otros ensayos, con índice de carga y tamaño de llanta diferentes, habrá que obtener la carga, el tiempo de calentamiento y la velocidad de ensayo, de las tablas de la norma.

Tabla 3.12: Etapas de ensayos C1

NEUMÁTICOS CLASE C1						
Nº de etapa	Rep./ Estado de carga		Descripción	Carga (daN)*	Velocidad (km/h)	Tiempo (min)
1	1	LT	Calentamiento	440	80	30
2			Deceleración	440	100->60	5
3		ST	Deceleración	10	100->60	10
4	2	LT	Calentamiento	440	80	10
5			Deceleración	440	100->60	10
6		ST	Deceleración	10	100->60	10
7	3	LT	Calentamiento	440	80	10
8			Deceleración	440	100->60	10
9		ST	Deceleración	10	100->60	10
Tiempo total por muestra de la experimentación (min)**						120
* 80% de LI. Tanto por ciento del índice de carga máximo del neumático. LI=88 (560 kg)						
**Tiempo aproximado. Debido a la duración de las etapas de deceleración.						

A continuación, describiré las principales etapas de ensayos numeradas en las tablas 3.12 y 3.13:

**Etapas 1, 4 y 7.** Calentamiento. Se realizará una aproximación del neumático al tambor y se mantendrá en contacto a una fuerza y velocidad constantes. La diferencia entre la primera etapa y el resto, recae en el tiempo de calentamiento.

**Etapas 2, 5 y 8.** Ensayo en carga o LT ("Load Test"). En estas etapas se mantendrá la carga de ensayo y se aumentará la velocidad 20 km/h por encima de la velocidad de ensayo para a continuación liberar el motor-variador de la máquina y dejar que se decelere hasta 20 km/h por debajo de la velocidad de ensayo.

Tabla 3.13: Etapas de ensayos C3

NEUMÁTICOS CLASE C3						
Nº de etapa*	Rep./ Estado de carga		Descripción	Carga (daN)**	Velocidad (km/h)	Tiempo (min)
1	1	LT	Calentamiento	3127	80	180
2			Deceleración	3127	100->60	10
4	2	LT	Calentamiento	3127	80	30
5			Deceleración	3117	100->60	10
7	3	LT	Calentamiento	3127	80	30
8			Deceleración	440	100->60	10
9	ST		Deceleración	40	100->60	10
Tiempo total por muestra de la experimentación (min)***						280
*Se ha eliminado las etapas intermedias de ST 3 y 6.						
** 85% de LI. Tanto por ciento del índice de carga máximo del neumático. LI=154 (3750 kg)						
***Tiempo aproximado. Debido a la duración de las etapas de deceleración.						

**Etapas 3, 6 y 9.** Ensayo de pérdidas o ST ("Skim Test"). Esta etapa es igual que las etapas 2, 5 y 8, pero reduciendo la carga de ensayo a la fuerza mínima que recomienda la norma para que haya contacto mínimo sin deslizamiento. Además, la duración de estas fases no es superior al tiempo máximo de parada entre ensayo y ensayo admitido por la norma. Como se ha demostrado en las pruebas previas realizadas, la temperatura del neumático puede caer en esta etapa, y para no tener que realizar el calentamiento completo, se ha decidido no superar el tiempo recomendado entre etapas. Se utilizaron unos valores de fuerza 10 daN para C1 y 40 daN para C3, dentro del rango de valores que propone la norma para los "skim test" de otros métodos.

### Medidas y evidencias finales

A continuación, se finalizará el ensayo con las pruebas y operaciones finales:

1. Inspección visual final. Los neumáticos se volverán a inspeccionar tras los ensayos, en el caso de detectarse alguna anomalía, esta será anotada en el informe de ensayo.
2. Pesaje del neumático: Se pesará el neumático con ayuda de un dinamómetro.
3. Foto de la muestra. Se realizará una foto de cada muestra ensayada.
4. Por último, al finalizar el ensayo procederemos al desmontaje del neumático y preparación del siguiente.

### Posprocesado de los datos

Finalmente, con los datos obtenidos y la formulación propuesta en la descripción del método de deceleración, ecuación (2.11), con una ligera variación para adaptar las variaciones de

método de ensayo usado, ecuación (3.7), realizaremos el posprocesado de los datos con ayuda de la hoja de cálculo (Excel) y software matemático (Matlab), con ayuda de la formulación siguiente:

$$CRR = K_{r25} \cdot K_d \cdot \frac{FRR}{L_m} \quad (3.7)$$

$$K_{r25} = 1 + K \cdot (t_{amb} - 25) ; K_d = \sqrt{\frac{1 + r_T/2}{1 + r_T/R}} \quad (3.8)$$

$$FRR = \frac{I_{RD}}{R} \cdot j_V + \frac{RI_T}{R_r^2} \cdot j_V - \frac{I_{RD}}{R} \cdot j_{V0} - \frac{RI_T}{R_{r0}^2} \cdot j_{V0} \quad (3.9)$$

Donde,

$CRR$ , es el coeficiente de resistencia a la rodadura, en N/kN.

$FRR$ , es la fuerza resistente a la rodadura, en N.

$L_m$ , es la carga del ensayo, en N.

$K_{r25}$ , es el coeficiente de corrección de temperatura, s.u.

$K$ , es la constante de temperatura, en  $1/^\circ\text{C}$ :

0,008 para C1

0,010 para C2

0,006 para C3

$I_P$ , es la inercia de la polea de salida, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

$t_{amb}$ , es la temperatura media del ambiente de ensayo, en  $^\circ\text{C}$ .

$K_d$ , es el coeficiente de corrección por diámetro del tambor de ensayo, s.u.

$r_T$ , es el radio de diseño del neumático, en m.

$R$ , es el radio del tambor de ensayos, en m.

$R_r$ , es el radio de rodadura del neumático bajo carga, en m.

$R_{r0}$ , es el radio de rodadura del neumático sin carga, en m.

$I_{RD}$ , es la inercia reducida del tambor de ensayo, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

$I_T$ , es la inercia del eje, neumático y rueda, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

$j_V$ , es la deceleración angular del tambor en ensayo con carga, en  $rad/s^2$

$j_{V0}$ , es la deceleración angular del tambor en ensayo sin carga, en  $rad/s^2$

## 3.2. Plan de ensayos

### 3.2.1. Introducción al plan de ensayo

Como se dijo al describir la metodología en el capítulo 1, se realizarán unos estudios comparativos del CRR entre una serie de neumáticos de origen o de partida, los mismos neumáticos raspados y posteriormente recauchutados. Se seleccionaron, para este fin, las siguientes muestras o grupos de neumáticos:

- 12 neumáticos nuevos de camión.
- 6 neumáticos usados de camión.
- 8 neumáticos nuevos de turismo.
- 4 neumáticos usados de turismo.

Las medidas y características de los neumáticos utilizados, las podemos encontrar en la tabla de relación de muestras del anexo A, tabla A.1.

Como hemos podido ver a lo largo de los apartados anteriores, por un lado, tendremos ensayos sobre neumáticos de clase C1 (turismo) y, por otro lado, ensayos sobre neumáticos de clase C3 (camión). Para cada clase, se van a ensayar en una primera fase, muestras de neumáticos nuevos y muestras de NFU aptos para recauchutar. A continuación, en una segunda fase, se raspará la banda de rodadura de todos los neumáticos hasta las proximidades de las lonas de protección y se volverán a ensayar. Para acabar, en una tercera fase, los neumáticos raspados de la fase anterior, serán recauchutados con un dibujo y banda similar a los de origen, y volverán a ser ensayados.

Por tanto, cada clase de neumático, sea nuevo o usado, pasara por las siguientes fases:

- Fase 1: ensayos sobre las muestras o grupos de neumáticos de origen seleccionadas/os.
- Fase 2: ensayos sobre las mismas muestras o grupos de neumáticos raspadas/os.
- Fase 3: ensayos sobre las mismas muestras o grupos de neumáticos recauchutadas/os.

Con los neumáticos nuevos, obtendremos un valor de CRR de una población con la menor variabilidad posible, es por ello, que se seleccionaron neumáticos de una mismo tipo y fabri-

cante. En neumáticos C1, tuvimos la posibilidad de seleccionar neumáticos nuevos de dos fabricantes, de los que podremos también analizar y obtenerse alguna conclusión entre ellos.

Para neumáticos nuevos de clase C3, se han seleccionado una medida habitual utilizadas en camión para transporte de mercancías de largo recorrido, lo que puede ser un neumático representativo del consumo de combustible asociado al neumático en el sector.

Para neumáticos nuevos de clase C1, se ha seleccionado una medida habitual entre utilitarios ligeros de tamaño pequeño, lo que representa una gran parte del parque automovilístico europeo, [5].

En cuanto a los NFU de clase C3, se han seleccionado neumáticos de tipos diferentes, de distintas fechas de fabricación y distinto grado de desgaste. A pesar de que todos ellos van a ser posteriormente recauchutados usando los mismos moldes y dibujos, se ha decidido utilizar una muestra de neumáticos de distintos tipos y características. Esto es, porque en la práctica, en la selección de entrada de carcassas en las fábricas de recauchutado, se realiza una verificación exhaustiva de sus dimensiones, geometría y el estado de conservación de su estructura, pero no se diferencia, habitualmente, entre los modelos de dibujos y tipos del neumático de partida.

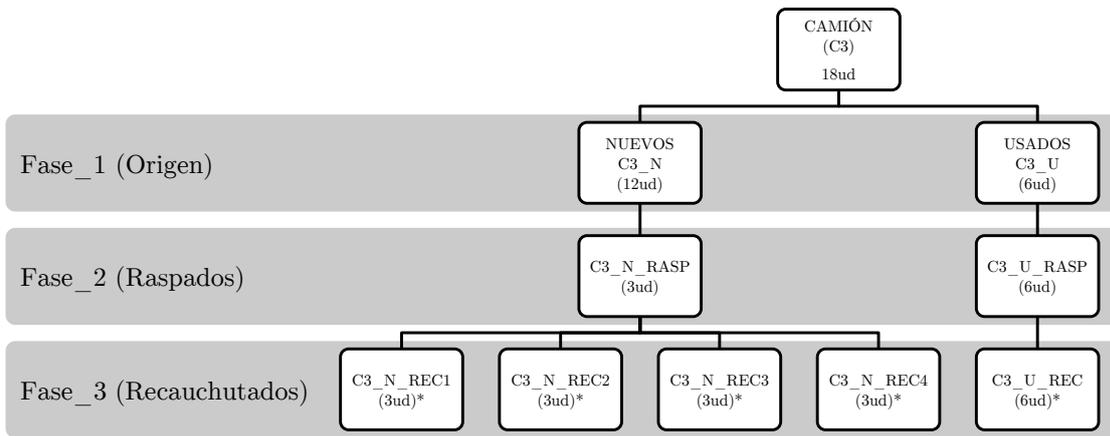
En cuanto a los NFU de clase C1, se han seleccionado de un solo tipo de neumático, mismo fabricante de primera marca que el nuevo y procedentes del mismo vehículo. Lo que en principio puede dar la impresión de un desgaste similar, pero puede estar más acusado en alguno de los neumáticos debido a su posición de montaje en el vehículo.

A continuación, vamos a explicar cómo se ha organizado el plan de ensayos para la obtención del CRR y otros datos. Distinguiremos, entre plan de ensayos C3 para camión y plan de ensayos C1 para turismos. Además, explicaremos cuál ha sido la selección específica de neumáticos para cada fase.

### **3.2.2. Plan de ensayos sobre neumáticos de camión (C3)**

En el organigrama de la figura 3.8, podemos observar el plan de ensayo desarrollado para neumáticos de camión, con el fin de obtener los datos necesarios en búsqueda de nuestros objetivos.

La tabla de relación de muestras, con todos los detalles y la correspondencia de grupos de muestras, la podemos encontrar en el anexo A, tabla A.1.



Ver descripción del tipo de recauchutado en cada grupo.

Figura 3.8: Diagrama plan de ensayo C3

### Fase 1

En la primera fase se realizarán ensayos para la obtención del CRR sobre 18 muestras seleccionadas de clase C3, de las cuáles, 12 serán neumáticos nuevos (C3.N) y 6 usados (C3.U).

El grupo C3.N corresponde a una selección neumáticos nuevos de igual medida, mismo tipo, igual fabricante y misma fecha de fabricación. Del resultado de estos ensayos se espera obtener un valor que represente el CRR de este grupo.

El grupo C3.U también estará formado por neumáticos del mismo fabricante, pero esta vez serán tipos diferentes, distintas fechas de fabricación y distinto grado de desgaste. Se han seleccionado neumáticos que pueden tener carcassas con las mismas características que las C3.N. Para garantizar la comparativa los neumáticos usados se ensayan con la misma fuerza de ensayo que los neumáticos nuevos, indierentemente del índice de carga del que provienen, que puede ser mayor. De esta población se espera tener un valor individual del estado original de estos neumáticos usados.

### Fase 2

En la segunda fase se realizarán ensayos para la obtención del CRR sobre 9 muestras raspadas, de las cuales, 3 serán neumáticos nuevos raspados (C3.N.RASP) y 6 usados raspados (C3.U.RASP). Los neumáticos serán raspados hasta 2 mm antes de llegar a las lonas y con un radio de raspado de 1000 mm. El interés de estos ensayos radica en su posible utilidad para estimar la parte de la resistencia a la rodadura que es debida a la carcassa, y la parte aportada por la banda de rodadura.

Del grupo C3.N.RASP, solo se realizarán ensayos sobre 3 neumático originales raspados, porque son previsiblemente muy repetibles debido a su estado sin uso. Del resultado de estos

ensayos se espera obtener un valor que represente el CRR de las carcadas nuevas.

Del grupo C3\_U\_RASP, se realizarán ensayos sobre todos los neumáticos usados raspados y se analizarán sus posibles diferencias. Para garantizar la comparativa las carcadas se ensayan con la misma fuerza de ensayo que los neumáticos nuevos, indiferentemente del índice de carga del que provienen, que pueden ser mayor en algún caso. Del resultado de estos ensayos se espera obtener un valor que represente el CRR de las carcadas usadas.

### Fase 3

En la tercera fase se realizarán ensayos para la obtención del CRR sobre 18 neumático, 12 de ellos serán recauchutados que provienen de carcadas nuevas y 6 recauchutados que provienen de carcadas usadas, después de haberlas raspado todas en la fase anterior.

En esta fase, el grupo C3\_N raspados de 12 neumático se recauchutarán en cuatro grupos de 3 neumáticos cada uno, cada grupo con un tipo diferente de caucho, tres se recauchutarán en caliente y uno en frío, según la siguiente distribución:

- 3 neumáticos nuevos, raspados y recauchutados en caliente con un primer compuesto de caucho (C3\_N\_REC1).
- 3 neumáticos nuevos, raspados y recauchutados en caliente con un segundo compuesto de caucho (C3\_N\_REC2).
- 3 neumáticos nuevos, raspados y recauchutados en caliente con un tercer compuesto de caucho (C3\_N\_REC3).
- 3 neumáticos nuevos, raspados y recauchutados en frío con banda precurada (C3\_N\_REC4).
- 6 neumáticos usados, raspados y recauchutados en caliente (C3\_U\_REC).

Los grupos C3\_N\_REC1, C3\_N\_REC2 y C3\_N\_REC3, se recauchutarán en caliente por el mismo fabricante con el mismo dibujo y molde, diseñado para el mismo tipo de neumático, pero con compuestos de banda de rodadura distintos. En estos neumáticos, se usará una banda de unión de 1 mm, y la temperatura y tiempo de curado seleccionado, será de 155° y 120 minutos. De estos tres grupos se espera obtener un valor que represente cada una de las tres fórmulas de caucho utilizadas. Para garantizar la comparativa entre fases, estos neumáticos se van a recauchutar con el mismo índice de carga y velocidad que los neumáticos nuevos y, por tanto, se ensayan con la misma fuerza de ensayo que estos. Una vez obtenidos los resultados, se analizarán y servirán para decidir que compuesto se va a utilizar para realizar los recauchutados de los neumáticos usados raspados, grupo C3\_U\_REC.

Se desconocen la composición de las tres formulaciones de goma que van a ser usadas en el

material añadido para el recauchutado en caliente de los anteriores grupos, pero se tienen detalles de algunos datos relacionados con las propiedades viscoelásticas, la adherencia y la abrasión del caucho vulcanizado. En la tabla 3.14 se muestra los resultados de una serie de pruebas realizadas sobre unas probetas de caucho vulcanizado para las tres formulaciones. Una vez obtenidos los resultados de resistencia a rodadura de los neumáticos recauchutados con estas fórmulas, se determinará junto a estas propiedades, cuál es el caucho más apropiado para la fase 3.

Tabla 3.14: Propiedades reológicas de los compuestos

PROPIEDAD	REC1	REC2	REC3
Índice de resistencia a la abrasión	69	65	43
Tangente de delta (0°C)	0,139	0,13	0,094
Tangente de delta (60°C)	0,113	0,097	0,092
Temperatura de transición vítrea (°C)	-47,6	-48,6	-52,6
Rebote a 23°C (%)	42	42	49
Rebote a 60°C (%)	52	53	57

Los neumáticos del grupo C3\_N\_REC4 se recauchutarán en frío con banda de rodadura precurada, de dibujo parecido a C3\_N\_REC1, C3\_N\_REC2 y C3\_N\_REC3. En este caso además de desconocer la composición de caucho de la banda, se desconoce también las propiedades del caucho vulcanizado. En estos neumáticos se usará una banda de unión de 1 mm, la temperatura y el tiempo de curado en autoclave seleccionado será de 110° y 4 horas. En este caso, para garantizar la comparativa entre fases, a los neumáticos recauchutados se les va a asignar el mismo índice de carga y velocidad que los neumáticos nuevos y, por tanto, se ensayan con la misma fuerza de ensayo que estos. De este grupo se espera un valor del CRR que represente este tipo de recauchutado.

El grupo C3\_U\_REC, como ya hemos dicho, será recauchutado en caliente con el mismo dibujo y molde que los grupos C3\_N\_REC1, C3\_N\_REC2 y C3\_N\_REC3 y el compuesto utilizado será seleccionado del mejor de ellos. Para garantizar la comparativa entre fases, se utilizará un tipo de molde y compuesto diseñado para el mismo índice de carga y velocidad que los neumáticos nuevos y, por tanto, se ensayan con la misma fuerza de ensayo que estos, indiferentemente del índice de carga del que provienen las carcassas. De este grupo se espera obtener un valor representativo del CRR de los neumáticos usados recauchutados en caliente.

### 3.2.3. Plan de ensayos sobre neumáticos de turismo (C1)

En el organigrama de la figura 3.9 podemos observar el plan de ensayo desarrollado para neumáticos de turismo, con el fin de obtener los datos necesarios en búsqueda de nuestros objetivos.

La tabla de relación de muestras A.1, con todos los detalles y la correspondencia de grupos

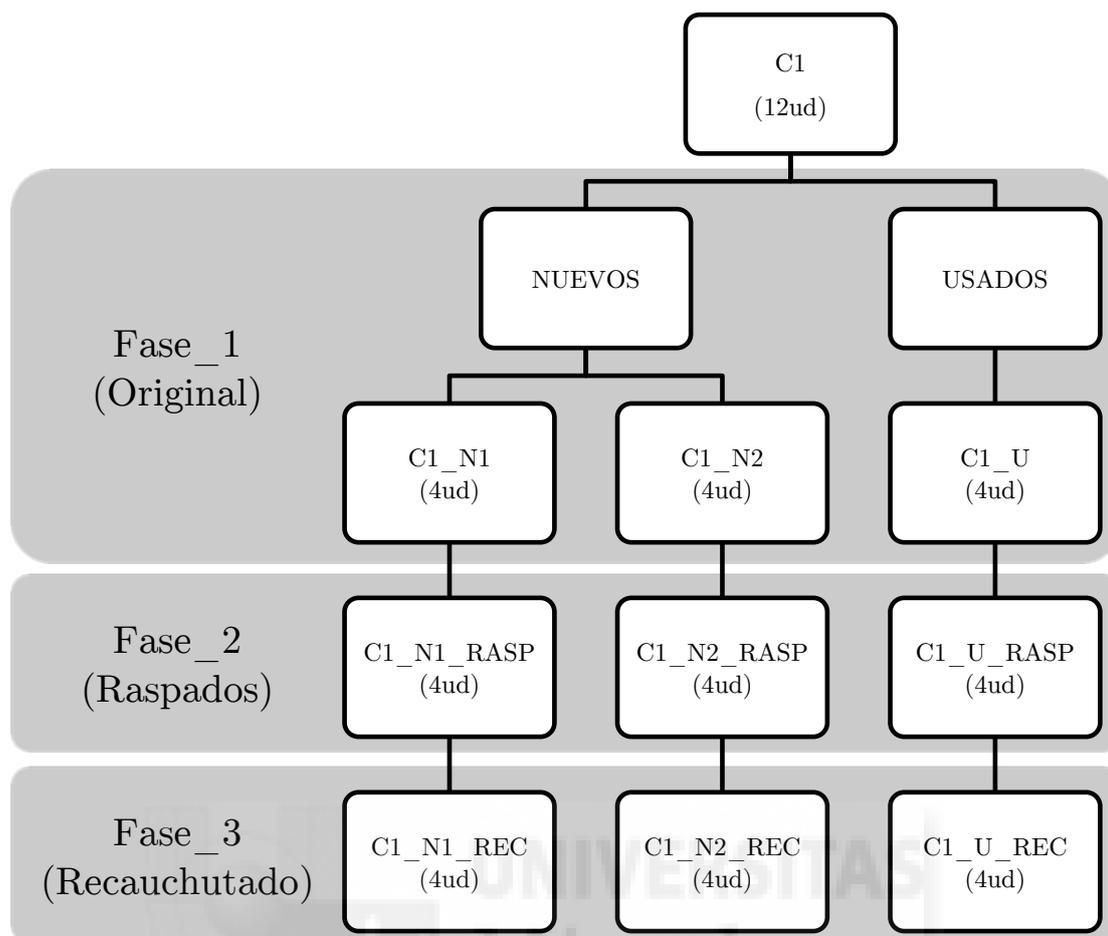


Figura 3.9: Diagrama plan de ensayo C1

de muestras, la podemos encontrar en el anexo A, tabla A.1.

### Fase 1

En la primera fase se realizarán ensayos para la obtención del CRR sobre 12 neumáticos seleccionados de clase C1, de los cuales, 4 serán neumáticos nuevos de un fabricante (C1\_N1), 4 serán nuevos de otro fabricante (C1\_N2) y 4 serán usados (C1\_U).

El grupo C1\_N1 corresponderá a una selección de neumáticos nuevos de igual medida, mismo tipo, igual fabricante y con fecha de fabricación próxima. Del resultado de estos ensayos se espera obtener un valor que represente el CRR de este grupo.

El grupo C1\_N2 corresponderá a una selección neumáticos nuevos de igual medida, mismo tipo, igual fabricante, pero distinto que el grupo C1\_N1 y con fecha de fabricación próxima. Del resultado de estos ensayos se espera obtener un valor que represente el CRR de este grupo. El grupo C1\_U estará formado por neumáticos del mismo fabricante, pero esta vez serán de las mismas fechas de fabricación y distinto grado de desgaste. Se seleccionarán neumáticos que pueden tener carcasas con las mismas características que las C1\_N1. De esta población se espera tener un valor individual del estado original de estos neumáticos usados.

## Fase 2

En la segunda fase se realizarán ensayos para la obtención del CRR sobre 12 neumáticos raspados, de las cuales, 4 serán neumáticos nuevos raspados del primer fabricante (C1\_N1\_RASP), 4 serán neumáticos nuevos raspados del segundo fabricante (C1\_N2\_RASP) y 4 serán neumáticos usados raspados (C1\_U\_RASP). Los neumáticos se rasparán hasta 2 mm antes de llegar a las lonas y con un radio de raspado de 295 mm. Del resultado de estos ensayos se espera obtener un valor muy repetible y representativo del CRR de las carcadas nuevas debido a su estado original sin uso.

Del grupo C1\_U\_RASP, se realizarán ensayos sobre todos los neumáticos raspados y se analizará sus posibles diferencias. Del resultado de estos ensayos se espera obtener un valor que represente el CRR de las carcadas usadas.

## Fase 3

En la tercera fase se realizarán ensayos para la obtención del CRR sobre 12 neumáticos de la fase anterior, de los cuales, 4 serán neumáticos nuevos raspados recauchutados del primer fabricante (C1\_N1\_REC), 4 serán neumáticos nuevos raspados recauchutados del segundo fabricante (C1\_N2\_REC) y 4 serán neumáticos usados raspados recauchutados (C1\_U\_REC).

En esta fase todos los grupos se recauchutarán en caliente por el mismo fabricante con el mismo compuesto, dibujo y molde. En este caso, al igual que sobre las muestras equivalentes de camión, se asegura la comparativa entre fases, al asignar el mismo índice de carga y velocidad que el de los neumáticos nuevos y, por tanto, se ensayan con la misma fuerza de ensayo que estos. En estos neumáticos no se usa banda de unión, y la temperatura y tiempo de curado seleccionado será de 155° y 30 minutos.

De los grupos C1\_N1\_REC y C1\_N2\_REC se espera obtener un valor del CRR que represente a cada fabricante. Del grupo C1\_U\_REC se espera obtener un valor un valor representativo del CRR de los neumáticos usados recauchutados en caliente y al ser de la misma marca y tipo que C1\_N1\_REC que nos pueda dar un orden de influencia de la carcada usada.

---

## Capítulo 4

### Resultados y discusión





## 4.1. Introducción

En este capítulo vamos a mostrar los resultados de todos los ensayos realizados, junto con la discusión de los mismos, donde se expondrán todas las coincidencias halladas y las conclusiones parciales formuladas.

Para identificar bien cada muestra y cada neumático, en la tabla A.1 del anexo A, se detalla la correspondencia de las referencias o codificación de muestras y neumáticos utilizados en este capítulo, así como las principales características de las muestras de partida.

Además, en las sucesivas tablas del anexo A, podemos encontrar para los diferentes estados por los que ha pasado el neumático (origen, raspado y recauchutado; fase 1, fase 2 y fase 3), las mediciones realizadas y datos obtenidos sobre cada neumático (tablas A.2, A.3 y A.4), y los resultados del CRR calculado a diferentes velocidades para cada uno (tablas A.5, A.6 y A.7).

Finalmente, en el último apartado del anexo A, se expone una relación de figuras donde podemos visualizar el aspecto de cada tipo de neumático ensayado.

A continuación, sacados de los datos de las tablas del anexo antes mencionado, se mostrarán estos resultados a través de tablas resumen y gráficos, en función de las necesidades de cada apartado de este capítulo.

## 4.2. Ensayos sobre neumáticos de camión

### 4.2.1. Ensayos sobre neumáticos nuevos (Fase 1)

En la tabla 4.1, se muestra un resumen de los principales resultados de los ensayos de resistencia a la rodadura de los neumáticos de camión nuevos, en su estado original.

La masa para todos los neumáticos de esta fase ha resultado ser de 61,1 kg, prácticamente coincidente en todos los neumáticos, tal y como cabía esperar en una serie de neumáticos nuevos de primera marca, provenientes, además, del mismo lote.

Como puede observarse en los resultados obtenidos, el CRR oscila entre 4,633 y 4,868 N/kN, valores que se encuentran en todos los casos, dentro del rango marcado por el etiquetado de los neumáticos (clase de eficiencia energética B:  $4,1 \leq \text{CRR} \leq 5$  N/kN). Estos resultados son además muy repetitivos, obteniéndose una desviación estándar de 0,077 N/KN, lo que permite tomar el valor de 4,709 N/kN como valor de referencia para el CRR a 80 km/h de este tipo de neumático.

Por último, para la temperatura máxima alcanzada en la zona del hombro y en la zona del

Tabla 4.1: Resultados neumáticos nuevos (Fase 1)

Grupo	Referencia origen	Fecha fabricación	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura hombro (°C)	Temperatura talón (°C)	
C3_N	UMH15EN003	1115	4,637	---	---	
	UMH15EN004	1115	4,634	46,9	52,7	
	UMH15EN005	1115	4,706	45,2	51,0	
	UMH15EN006	1115	4,753	45,8	51,0	
	UMH15EN007	1115	4,753	47,8	55,9	
	UMH15EN008	1115	4,655	44,8	53,1	
	UMH15EN009	1115	4,803	45,0	53,2	
	UMH15EN010	1115	4,868	44,7	52,9	
	UMH15EN011	1115	4,757	44,2	52,7	
	UMH15EN012	1115	4,633	44,9	52,0	
	UMH15EN013	1115	4,645	45,5	52,5	
	UMH15EN014	1115	4,669	44,7	51,6	
	<b>Promedio</b>			<b>4,709</b>	<b>45,4</b>	<b>52,6</b>
	<b>Desviación estándar</b>			<b>0,077</b>	<b>1,1</b>	<b>1,3</b>

talón, se obtienen unos valores medios de 45,4°C y 52,6°C, con unas desviaciones estándar de 1,1°C y 1,3°C, respectivamente. Estos valores, podrán tener interés al compararlos con los obtenidos en ensayos posteriores.

#### 4.2.2. Ensayos sobre carcassas nuevas raspadas (Fase 2)

En la tabla 4.2, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la rodadura sobre las 3 carcassas raspadas de la fase 1, ensayadas antes de recauchutar.

Tabla 4.2: Resultados carcassas nuevas (Fase 2)

Grupo	Referencia origen	Referencia raspado	Fecha raspado	Masa (kg)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura hombro (°C)	Temperatura talón (°C)
C3_N_RASP	UMH15EN007	UMH15EN043	3915	46,1	3,208	40,7	46,4
	UMH15EN010	UMH15EN041	3915	45,8	3,304	43,0	50,1
	UMH15EN014	UMH15EN042	3915	45,7	3,393	41,5	49,2
<b>Promedio</b>				<b>45,9</b>	<b>3,302</b>	<b>41,7</b>	<b>48,6</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0,2</b>	<b>0,093</b>	<b>1,2</b>	<b>1,9</b>

El interés de estos ensayos radica en su posible utilidad para estimar la parte de la resistencia a la rodadura que es debida a la carcassa, y la parte aportada por la banda de rodadura.

En este caso, la masa y el CRR han resultado tener unas desviaciones bajas, consecuencia de la alta homogeneidad encontrada en los neumáticos. Esta desviación nos permite elegir el valor de 3,302 N/kN, como promedio del CRR a 80 km/h de este grupo.

En cuanto a los valores de temperatura, se observa una dispersión similar a los neumáticos nuevos (C3\_N), en la temperatura del hombro, y algo mayores en la temperatura del talón.

### 4.2.3. Ensayos sobre neumáticos nuevos recauchutados (Fase 3)

En la tabla 4.3, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la rodadura sobre los 12 neumáticos de las anteriores fases recauchutados.

Tabla 4.3: Resultados neumáticos recauchutados sobre carcasas nuevas (Fase 3)

Grupo	Referencia origen	Referencia recauchutado	Fecha fabricación	Masa (kg)	Profundidad banda (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura hombro (°C)	Temperatura talón (°C)
C3_N_REC1	UMH15EN005	UMH15EN036	3915	66,5	21,5	7,583	56,5	62,3
	UMH15EN006	UMH15EN033	3915	66,2	21,8	7,581	56,7	61,3
	UMH15EN012	UMH15EN038	3915	66,0	20,5	7,527	55,2	61,2
<b>Promedio</b>				<b>66,2</b>	<b>21,3</b>	<b>7,563</b>	<b>56,1</b>	<b>61,6</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0,3</b>	<b>0,7</b>	<b>0,032</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>
C3_N_REC2	UMH15EN003	UMH15EN039	3915	66,2	21,5	7,340	59,8	61,1
	UMH15EN009	UMH15EN032	3915	66,5	21,5	7,285	59,5	63,6
	UMH15EN013	UMH15EN035	3915	66,2	22,0	7,141	54,3	59,6
<b>Promedio</b>				<b>66,3</b>	<b>21,6</b>	<b>7,255</b>	<b>57,9</b>	<b>61,4</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,102</b>	<b>3,1</b>	<b>2,1</b>
C3_N_REC3	UMH15EN004	UMH15EN037	3915	65,7	21,5	7,589	54,6	60,7
	UMH15EN008	UMH15EN034	3915	67,0	21,5	7,646	54,4	62,0
	UMH15EN011	UMH15EN040	3915	66,0	21,5	7,664	55,3	62,3
<b>Promedio</b>				<b>66,2</b>	<b>21,5</b>	<b>7,633</b>	<b>54,8</b>	<b>61,7</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0,7</b>	<b>0,0</b>	<b>0,039</b>	<b>0,5</b>	<b>0,8</b>
C3_N_REC4	UMH15EN007	UMH16EN052	2216	66,1	20,4	7,802	---	---
	UMH15EN010	UMH16EN051	2216	66,0	20,4	7,719	---	---
	UMH15EN014	UMH16EN050	2216	65,7	20,5	7,848	---	---
<b>Promedio</b>				<b>65,9</b>	<b>20,4</b>	<b>7,790</b>	<b>---</b>	<b>---</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,065</b>	<b>---</b>	<b>---</b>
<b>Promedio 3 grupos (C3_N_REC1, REC2 y REC3)</b>				<b>66,2</b>	<b>21,5</b>	<b>7,484</b>	<b>56,3</b>	<b>61,6</b>
<b>Desviación estándar 3 grupos</b>				<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,183</b>	<b>2,1</b>	<b>1,2</b>
<b>Promedio total (C3_N_REC)</b>				<b>66,1</b>	<b>21,2</b>	<b>7,560</b>	<b>---</b>	<b>---</b>
<b>Desviación estándar total</b>				<b>0,3</b>	<b>0,6</b>	<b>0,211</b>	<b>---</b>	<b>---</b>
<b>Mínimo</b>				<b>65,7</b>		<b>7,141</b>	<b>54,3</b>	<b>59,6</b>
<b>Máximo</b>				<b>67,0</b>		<b>7,848</b>	<b>59,8</b>	<b>63,6</b>

Como puede observarse, la repetitividad obtenida para cada muestra de 3 neumáticos recauchutados con un mismo compuesto es muy alta, obteniéndose valores de desviación que permiten considerar el valor medio obtenido en cada caso, como valor representativo del CRR medido a 80 km/h para cada tipo de compuesto.

De una primera observación de los valores medios del CRR a 80 km/h obtenidos para cada compuesto, puede concluirse que, en todos los casos, los neumáticos recauchutados sobre carcasas nuevas presentan valores de resistencia a la rodadura entre 7,141 y 7,848 N/kN, lo que los situaría en la parte superior de la clase de eficiencia energética E según el Reglamento (CE) 1222/2009 (valores entre 7,1 y 8 N/kN).

#### Análisis de resultados y selección del compuesto óptimo

Por otra parte, a la vista de los resultados, parece claro que el compuesto REC2 conduce a valores de la resistencia a la rodadura inferiores en aproximadamente 0,3 N/kN y 0,4 N/kN a los compuestos REC1 y REC3, respectivamente. En consecuencia, comparando REC1 y REC3, no podemos apreciar diferencias porque son del mismo orden y sus valores medios

están muy próximos.

Se ha reforzado este análisis con un posprocesado Tukey[70] a partir de una prueba ANOVA de los valores del CRR para las tres muestras recauchutadas en caliente con diferente compuesto, al que se le ha añadido la muestra recauchutada en frío para un análisis posterior. Se ha seleccionado un intervalo de confianza del 95 % para la realización del posprocesado Tukey[70].

En la tabla 4.4 se muestran los resultados de esta prueba, donde se han agrupado los valores medios separados en subconjuntos homogéneos.

Tabla 4.4: Subconjuntos homogéneos de Tukey para análisis de compuestos

CRR a 80 km/h (N/kN)				
HSD Tukey <sup>a</sup>				
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
C3_N_REC2	3	7,256		
C3_N_REC1	3		7,564	
C3_N_REC3	3		7,633	7,633
C3_N_REC4	3			7,790
Significación		1,000	0,588	0,075
Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.				
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.				

Analizando esta tabla 4.4, podemos observar que se han formado tres subconjuntos, uno para la muestra C3\_N\_REC4, otro para la muestra C3\_N\_REC2 y otro para las muestras C3\_N\_REC1 y C3\_N\_REC3. Este resultado indica que, la muestra C3\_N\_REC2, se diferencia significativamente del resto. En vista de los resultados expuestos en esta tabla, junto con los resultados mostrados por el gráfico de barras de la figura 4.1, podemos decir que hay una clara ventaja en términos de resistencia a la rodadura de la muestra C3\_N\_REC2 respecto al subconjunto C3\_N\_REC1 y C3\_N\_REC3.

Por otra parte, comparando los valores del CRR con los resultados de las propiedades del caucho vistas en la tabla 3.14 expuesta en la definición del plan de ensayo de camión del capítulo 3, se ha observado que la disminución en el CRR observado de la muestra C3\_N\_REC2 frente al de la C3\_N\_REC1, concuerda con los resultados de la  $tg \delta$  medida a 60°C para los compuestos analizados, mostrando valores para el compuesto REC2 también inferiores al REC1. Por otro lado, el resultado de la  $tg \delta$  a 60°C del compuesto REC3, ha sido inferior al de los otros dos compuestos, lo que no coincide con el valor obtenido del CRR de la muestra C3\_N\_REC3, que ha resultado obtener valores inferiores a los otros dos compuestos. Esto podría ser debido a que la capacidad de disipar calor al exterior de este compuesto ha sido menor, lo que se puede aparejar con el valor observado de temperatura del hombro, menor que en las otras dos muestras.

Respecto a la máxima temperatura medida en la zona del talón, los resultados obtenidos

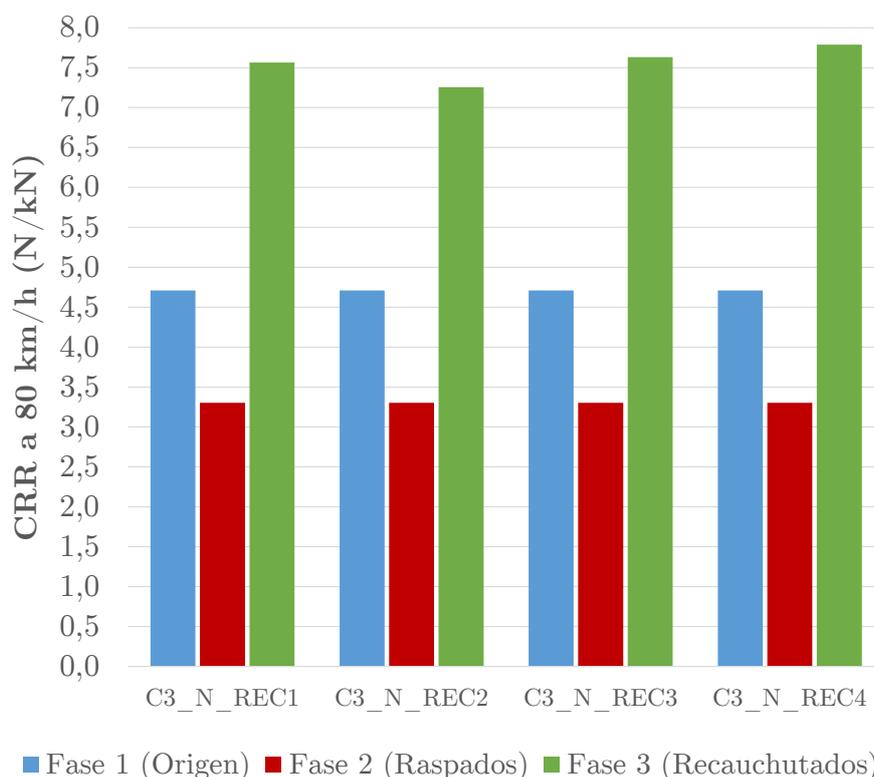


Figura 4.1: Comparación del CRR entre compuestos

entre C3\_N\_REC1, C3\_N\_REC2 y C3\_N\_REC3 son similares, con una diferencia máxima de  $0,3^{\circ}\text{C}$  lo que indica que prácticamente la disipación de calor debido al rozamiento llanta-neumático, es constante en todos los ensayos. Esto tiene sentido, ya que según algunos autores [14], el efecto de generación de calor en la zona del talón está en torno al 15% de todas las pérdidas y los posibles efectos de calor debido a la histéresis del material en esta zona son bajos. Además, estos efectos pueden estar enmascarados por otros como la fricción llanta-neumático.

Finalmente, en vista a las propiedades del compuesto REC3, que ha resultado tener peores propiedades de abrasión y de adherencia en mojado ( $\text{tg } \delta$  a  $0^{\circ}$ ), así como un valor de CRR obtenido en los ensayos mayor que el resto de compuestos, se decide seleccionar el compuesto REC2 para el posterior recauchutado de la muestra de neumáticos usados (C3\_U\_REC).

#### 4.2.4. Ensayos sobre neumáticos usados (Fase 1)

En la tabla 4.5, se muestra un resumen de los principales resultados de los ensayos sobre los neumáticos de camión usados.

Como puede apreciarse, la dispersión es significativamente mayor que en los ensayos realizados sobre neumáticos nuevos, obteniéndose una desviación grande y, por tanto, pueden no representar un valor de conjunto. Esto puede ser debido a que el grado de desgaste de los neumáticos es diferente, además el estado de conservación y el uso anterior se desconocen,

Tabla 4.5: Resultados neumáticos usados (Fase 1)

Grupo	Referencia origen	Fecha fabricación	Masa (kg)	Profundidad banda (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura hombro (°C)	Temperatura talón (°C)
C3_U	UMH15EN026	2311	52,0	15,1	4,398	54,4	53,8
	UMH15EN027	1713	52,0	8,8	3,656	44,0	48,7
	UMH15EN028	0314	53,0	1,6	4,094	53,5	53,7
	UMH15EN029	1013	52,0	9,2	3,724	40,2	47,2
	UMH15EN030	2112	54,0	9,5	4,375	45,4	49,5
	UMH15EN031	4810	51,0	6,4	3,752	43,3	47,4
<b>Promedio</b>			<b>52,3</b>	<b>8,4</b>	<b>4,000</b>	<b>46,8</b>	<b>50,0</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>1,1</b>	<b>4,4</b>	<b>0,336</b>	<b>5,8</b>	<b>3,0</b>

causas que también podrían afectar. Por tanto, con la muestra C3\_U ensayada, no se ha podido establecer una ley clara que relacione el CRR obtenido con el grado de desgaste y la edad de carcasa.

No obstante, si se agrupan los neumáticos por uso y dibujos de banda, se obtienen valores de desviación más bajos, y por tanto valores medios significativos; probablemente fruto de la coincidencia de las características de las carcacas de los neumáticos usados. Viendo las imágenes de las bandas de los neumáticos de la figura A.2 del anexo A, vemos que la muestra C3\_U1 tiene un dibujo mixto de ranuras y bloques rectangulares, normalmente destinado al uso en ejes tractores y por otro lado, que la muestra C3\_U2 posee dibujo de ranuras circunferenciales, cuyo uso es más polivalente y permite montarse en cualquier eje del vehículo.

Tabla 4.6: Resultados neumáticos usados (Fase 1), agrupados por tipo

Grupo	Referencia origen	Fecha fabricación	Masa (kg)	Profundidad banda (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura hombro (°C)	Temperatura talón (°C)
C3_U1	UMH15EN026	2311	52,0	15,1	4,398	54,4	53,8
	UMH15EN028	0314	53,0	1,6	4,094	53,5	53,7
	UMH15EN030	2112	54,0	9,5	4,375	45,4	49,5
	<b>Promedio</b>			<b>53,0</b>	<b>8,8</b>	<b>4,289</b>	<b>51,1</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>1,0</b>	<b>6,8</b>	<b>0,169</b>	<b>5,0</b>	<b>2,5</b>
C3_U2	UMH15EN027	1713	52,0	8,8	3,656	44,0	48,7
	UMH15EN029	1013	52,0	9,2	3,724	40,2	47,2
	UMH15EN031	4810	51,0	6,4	3,752	43,3	47,4
	<b>Promedio</b>			<b>51,6</b>	<b>8,1</b>	<b>3,711</b>	<b>42,5</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>0,6</b>	<b>1,5</b>	<b>0,049</b>	<b>2,0</b>	<b>0,9</b>

Como puede verse en la tabla 4.6, agrupados de esta manera la muestra C3\_U1 y C3\_U2, presentan un valor medio de CRR de 4,29 N/kN y 3,71 N/kN, respectivamente. Destacar que, además, el valor medio de la muestra C3\_U2 (dibujo de ranuras circunferenciales) es inferior al de la muestra C3\_U1 (dibujo mixto de ranuras y bloques rectangulares), lo que coincide con las conclusiones de algunos autores[45].

En cualquier caso, cabe destacar el hecho de que, en todos los casos, los CRR obtenidos son inferiores a los valores obtenidos para los neumáticos nuevos. Este efecto es consecuencia de

la menor cantidad de material en la banda de rodadura, y por tanto, de la menor cantidad de energía generada por histéresis en cada ciclo de deformación de la misma.

Por otra parte, si observamos los valores de CRR en función de la profundidad, dentro de cada uno de los tipos considerados se puede apreciar una influencia de la antigüedad del neumático y del grado de desgaste. En general, la tendencia parece ser un aumento de la resistencia a la rodadura con la antigüedad del neumático y con la cantidad de goma residual. A pesar de que la variación debido a estos factores no parece ser excesivamente significativa y el tamaño de muestra es pequeño para poder establecer conclusiones definitivas al respecto, estos resultados están en consonancia con estudios de otros autores, [44].

En cuanto a la temperatura superficial medida en la zona del hombro, se observa una gran dispersión. Cabe señalar, no obstante, que el distinto estado de conservación, textura y coloración de la superficie de los neumáticos usados puede haber desviado las mediciones en algunos casos y por tanto, estos resultados deben ser evaluados con cautela.

#### 4.2.5. Ensayos sobre carcassas usadas raspadas (Fase 2)

En la tabla 4.7, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la rodadura sobre estas carcassas usadas raspadas.

Tabla 4.7: Resultados carcassas usadas (Fase 2)

Grupo	Referencia origen	Referencia raspado	Fecha raspado	Masa (kg)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura hombro (°C)	Temperatura talón (°C)
C3_U_RASP	UMH15EN026	UMH15EN051	4415	42,8	3,592	42,1	47,5
	UMH15EN027	UMH15EN052	4415	42,8	3,840	39,2	44,5
	UMH15EN028	UMH15EN053	4415	45,4	3,404	42,3	46,5
	UMH15EN029	UMH15EN054	4415	43,8	4,238	41,5	45,6
	UMH15EN030	UMH15EN055	4415	43,8	4,209	42,2	46,0
	UMH15EN031	UMH15EN056	4415	43,8	4,065	43,6	48,1
<b>Promedio</b>				<b>43,7</b>	<b>3,891</b>	<b>41,8</b>	<b>46,4</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0,9</b>	<b>0,341</b>	<b>1,4</b>	<b>1,3</b>

En este caso, se vuelve a apreciar una desviación alta de los resultados, lo que está en consonancia con lo neumáticos usados de partida. Esto puede reflejar un grado de desgaste y antigüedad diferentes, lo que podría haber producido una modificación de las propiedades de los materiales que conforman el neumático.

Por otra parte, agrupando de nuevo por uso y dibujo de banda del neumático de origen, tabla 4.8, los dos grupos de carcassas usadas raspadas muestran unas desviaciones altas, por lo que no se ha podido establecer una relación clara, como ocurría en los ensayos sobre neumáticos usados.

Cabe destacar que, en contra de lo esperado, la muestra C3\_U2\_RASP presenta un CRR mayor que los neumáticos usados de origen, esto puede deberse a que el material eliminado

Tabla 4.8: Resultados carcasas usadas (Fase 2), agrupados por tipo

Grupo	Referencia origen	Referencia raspado	Fecha raspado	Masa (kg)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura hombro (°C)	Temperatura talón (°C)
C3_U1_RASP	UMH15EN026	UMH15EN051	4415	42,8	3,592	42,1	47,5
	UMH15EN028	UMH15EN053	4415	45,4	3,404	42,3	46,5
	UMH15EN030	UMH15EN055	4415	43,8	4,209	42,2	46,0
Promedio				<b>44,0</b>	<b>3,735</b>	<b>42,2</b>	<b>46,7</b>
Desviación estándar				<b>1,3</b>	<b>0,421</b>	<b>0,1</b>	<b>0,7</b>
C3_U2_RASP	UMH15EN027	UMH15EN052	4415	42,8	3,840	39,2	44,5
	UMH15EN029	UMH15EN054	4415	43,8	4,238	41,5	45,6
	UMH15EN031	UMH15EN056	4415	43,8	4,065	43,6	48,1
Promedio				<b>43,5</b>	<b>4,048</b>	<b>41,4</b>	<b>46,1</b>
Desviación estándar				<b>0,6</b>	<b>0,200</b>	<b>2,2</b>	<b>1,8</b>

en el proceso de raspado y la consiguiente pérdida de diámetro y rigidez, hace que se dé una mayor deformación en la zona de la banda de rodadura durante el ensayo, lo que puede haber producido mayores pérdidas por histéresis.

#### 4.2.6. Ensayos sobre neumáticos usados recauchutados (Fase 3)

En la tabla 4.9, se resumen los resultados obtenidos de las carcasas recauchutadas con el compuesto seleccionado, mismo compuesto que el usado en la muestra C3\_N\_REC2.

Tabla 4.9: Resultados neumáticos recauchutados sobre carcasas usadas (Fase 3)

Grupo	Referencia origen	Referencia recauchutado	Fecha fabricación	Masa (kg)	Profundidad banda (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)
C3_U_REC	UMH15EN026	UMH15EN060	4815	62,5	19,9	7,824
	UMH15EN027	UMH15EN061	4815	62,4	19,9	7,509
	UMH15EN028	UMH15EN062	4815	64,5	20,7	7,546
	UMH15EN029	UMH15EN063	4815	62,3	21,2	7,575
	UMH15EN030	UMH15EN064	4815	63,7	19,9	7,587
	UMH15EN031	UMH15EN065	4815	63,8	19,9	7,703
Promedio				<b>63,3</b>	<b>20,2</b>	<b>7,624</b>
Desviación estándar				<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,118</b>

En primer lugar, se ha de remarcar que debido a un problema técnico con la cámara termográfica, estos ensayos no disponen de valores de medición de temperatura, por tanto, en este caso no podrán ser presentados y analizados.

Los valores de la rodadura a 80 km/h obtenidos para esta muestra de neumáticos recauchutados, varían entre 7,51 y 7,82 N/kN. A pesar de que se han encontrado variaciones de peso entre neumáticos de 2 kg, debidas posiblemente a las diferencias geométricas entre las carcasas usadas de partida, no se ha podido establecer ninguna ley de variación clara de CRR, ni en función de la masa ni de las características medidas de las carcasas de partida.

En cualquier caso, el valor medio del CRR del conjunto de datos se encuentra en 7,6 N/kN,

y la desviación estándar de estos neumáticos recauchutados es mucho menor que la que se obtuvo para las carcacas raspadas (figura 4.7); lo que nos permite presentarlo como valor medio representativo de los neumáticos recauchutados sobre carcacas usadas con el nuevo compuesto.

#### 4.2.7. Análisis comparativo de los resultados de camión

En este punto analizaremos las diferencias entre los valores medios de las muestras en diferentes estados, ya sean nuevos o usados: origen o de partida (fase 1), raspados (fase 2) y recauchutados (fase 3). Para las conclusiones obtenidas, nos apoyaremos del resumen de resultados de la tabla 4.10 y de las gráficas de barras de la figura 4.2, así como de otros recursos particularizados para cada apartado.

Tabla 4.10: Resultados medios muestras de camión

Estado	Fase	Muestra	Masa (kg)	Profundidad banda (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura hombro (°C)	Temperatura talón (°C)
NUEVO	1	C3 N	61,1	15,4	4,709	45,4	52,6
	2	C3 N RASP	45,9	---	3,302	41,7	48,6
	3	C3 N REC1	66,2	21,3	7,563	56,1	61,6
		C3 N REC2	66,3	21,6	7,255	57,9	61,4
		C3 N REC3	66,2	21,5	7,633	54,8	61,7
		C3 N REC4	65,9	20,4	7,790	---	---
		C3 N REC1, REC2 y REC3	66,2	21,5	7,484	56,3	61,6
		C3 N REC	66,1	21,2	7,560	56,3	61,6
USADO	1	C3 U	52,3	8,4	4,000	46,8	50,0
		C3 U1	53,0	8,8	4,289	51,1	52,3
		C3 U2	51,6	8,1	3,711	42,5	47,8
	2	C3 U RASP	43,7	---	3,891	41,8	46,4
		C3 U1 RASP	44,0	---	3,735	42,2	46,7
		C3 U2 RASP	43,5	---	4,048	41,4	46,1
	3	C3 U REC	63,2	20,2	7,624	43,9	---
		C3 U1 REC	63,6	20,2	7,652	43,9	---
		C3 U2 REC	62,8	20,3	7,596	43,9	---

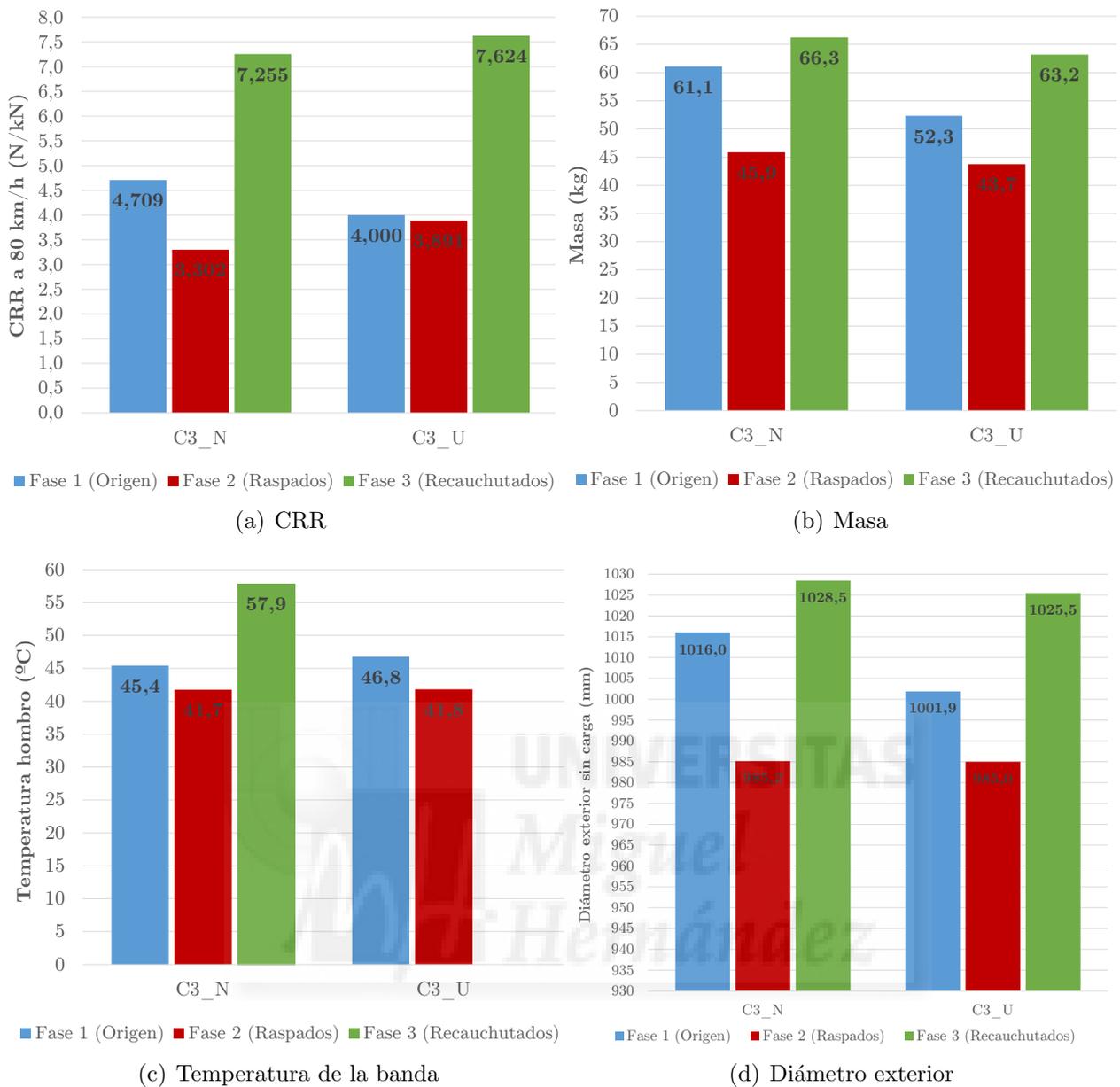


Figura 4.2: Principales propiedades entre fases

### Comparación del CRR entre los neumáticos nuevos y los recauchutados

Con el objetivo de no tener en cuenta la influencia de la carcasa usada, analizaremos la diferencia fundamental que hay entre un neumático nuevo y uno recauchutado. Si comparamos el resultado de la muestra de neumáticos nuevos (C3\_N), con el valor promedio de todos los neumáticos recauchutados (C3\_N\_REC), podemos observar que el valor medio del CRR se incrementa un 61 %, figura 4.3. Esto debe ser achacable, en parte, a la diferencia de prestaciones de los nuevos compuestos introducidos en la banda de rodadura respecto a los originales. Pero también puede tener gran influencia la cantidad de material añadido en la banda de rodadura, que hace que los neumáticos recauchutados tengan una masa y profundidad de banda media superior a los nuevos en 5 kg y 6 mm respectivamente.

Cabe señalar que, históricamente, el usuario de neumáticos recauchutados suele pedir más

espesor de banda para aumentar la duración en kilómetros del neumático, buscando un ahorro en la compra de neumáticos. Pero tal vez, si los neumáticos recauchutados tuvieran el mismo espesor de material y masa distribuida sobre la nueva banda que los nuevos, los valores de CRR estarían más próximos.

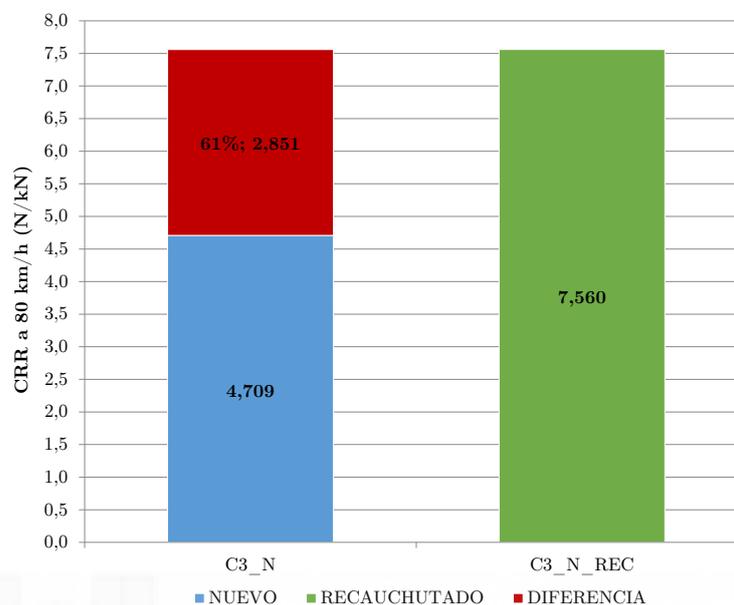


Figura 4.3: Diferencia del CRR entre nuevos y recauchutados

### Influencia del tipo de material aportado en la banda de rodadura

Analizando el tipo de material aportado en la banda durante el proceso de recauchutado, como ya hemos visto en las tablas 4.4 y 4.9, y en la figura 4.1, la influencia del material aportado en el proceso de recauchutado en caliente, no parece tener excesiva influencia sobre el CRR.

Por otro lado, al comparar los neumáticos recauchutados en caliente (C3\_N\_REC1, C3\_N\_REC2 y C3\_N\_REC3), donde se han encontrado una diferencia máxima entre ellas del 5%, con los recauchutados en frío (C3\_N\_REC4). Figura 4.4. Se ha observado que el valor promedio de los neumáticos recauchutados en frío es un 4% superior a los recauchutados en caliente, lo que parece ir en contra de las conclusiones expuestas en el proyecto RETYRE [46], aunque la diferencia no es excesivamente significativa.

Cabe destacar que solo se ha recauchutado en frío con un tipo de banda precurada y que, además, debido a que se utilizó la muestra raspada de carcasas nuevas ensayadas para ser recauchutadas en frío, se les tuvo que añadir material en los flancos debido a que estos fueron eliminados en el proceso de raspado anterior. Atendiendo a este factor, podemos destacar que, observando la diferencia de la sección del neumático entre muestras (ver tablas A.2, A.3 y A.4 del anexo A), se ha detectado que el espesor del flanco añadido es ligeramente mayor que el original y por tanto, cabe esperar que esta cantidad de material añadido contribuya

al efecto de pérdidas en la zona del flanco.

Los motivos antes expuestos, sumado a que las posibles diferencias entre procesos de recauchutado que pueden haber concentrado material de forma diferente en la sección de la banda, y con ello haber afectado a las pérdidas generadas en esta zona, hacen que resulte arriesgado sacar conclusiones generales respecto a la influencia del tipo de recauchutado en el CRR.

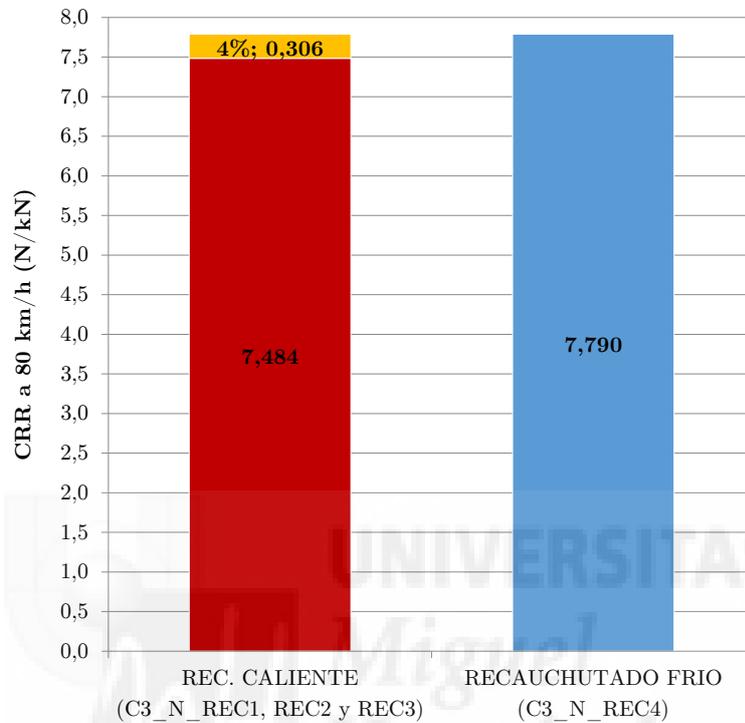


Figura 4.4: Diferencia del CRR entre recauchutado en caliente y en frío

### Influencia del estado de la carcasa y su masa en el CRR

A continuación, analizaremos el valor añadido al CRR tras el recauchutado y el factor de influencia de la carcasa, figura 4.6. Cabe indicar que el valor medio del CRR obtenido en los ensayos sobre carcasas usadas raspadas (C3\_U\_RASP) ha sido superior en 0,59 N/kN, al obtenido con las carcasas nuevas (C3\_N\_RASP). Esta influencia se ha visto reflejada también en el resultado obtenido una vez recauchutadas las carcasas anteriores con el mismo compuesto (C3\_N\_REC2 y C3\_U\_REC), aunque en este caso ha sido de 0,37 N/kN superior, lo que supone un menor efecto que el valor observado entre las carcasas nuevas y usadas raspadas.

Cabe destacar que, aunque los neumáticos recauchutados nuevos (C3\_N\_REC2) y las carcasas de estos (C3\_N\_RASP), tienen mayor masa que los usados recauchutados y sus carcasas (C3\_U\_REC y C3\_U\_RASP), los neumáticos nuevos recauchutados han resultado tener menor CRR. Este comportamiento puede ser debido a que el material remanente en la carcasa usada tiene menos elasticidad y, aun siendo menor que en el de las carcasas nuevas, parece haber

perdido propiedades, lo que puede haber aumentado las pérdidas por histéresis en la carcasa.

Se achaca, además, el hecho de que la carcasa usada tenga menos masas que la nueva a que, durante el uso del neumático en circulación, este está sometido a una serie de cargas que, junto con la presión de inflado, producen el aplastamiento de los materiales de las carcassas y banda, lo que hace que cambie la forma de su estructura natural. Si a este fenómeno le añadimos los esfuerzos dinámicos que fatigan y deterioran los propios materiales del neumático, produciendo en ocasiones elongaciones en los mismos, puede producirse un aumento del diámetro exterior del neumático. Como el diámetro exterior de raspado para ambas muestras es el mismo, cabe esperar que en las carcassas de neumáticos usados se haya eliminado algo más de material que en las nuevas.

Por otro lado, comparando los subgrupos C3\_U1 y C3\_U2, formados a partir de la muestra de neumáticos usados C3\_U, separadas por tipo de uso (figura 4.5), se ha observado que hay diferencias entre los valores de las carcassas raspadas, siendo la muestra C3\_U2\_RASP un 8 % (0,31 N/kN) superiores a la C3\_U1\_RASP. Este efecto puede ser debido al tipo de carcasa. No obstante, esta diferencia se reduce al 1 % (0,06 N/kN) tras comparar los valores del CRR de estos mismo subgrupos tras el recauchutado, muestras C3\_U1\_REC y C3\_U2\_REC. Este fenómeno podría ser achacable a que todos los neumáticos se han recauchutado bajo las mismas condiciones y el efecto de la diferencia entre las carcassas se ha disipado, en gran medida, tras el proceso de recauchutado.

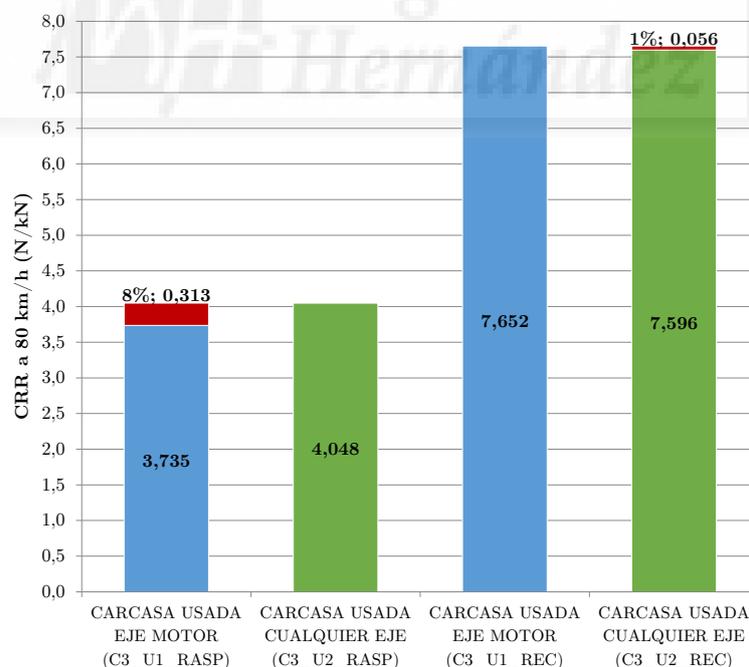
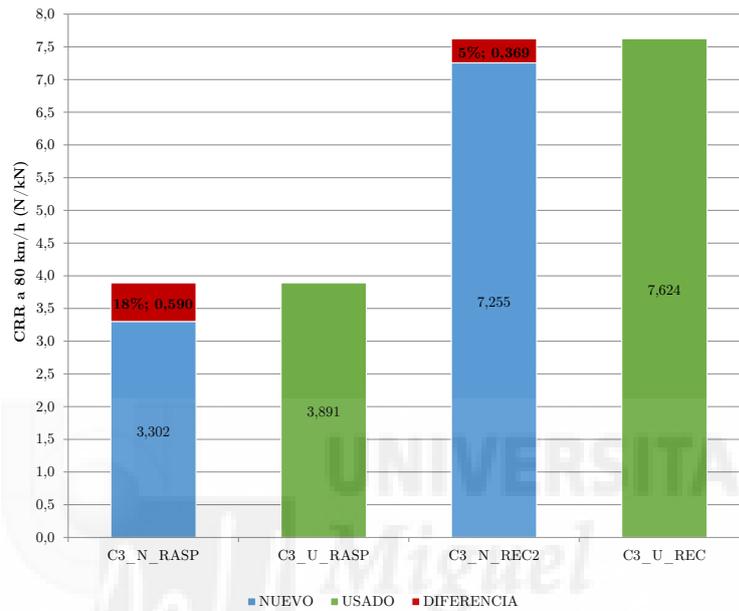


Figura 4.5: Diferencia del CRR entre subgrupos de neumáticos usados

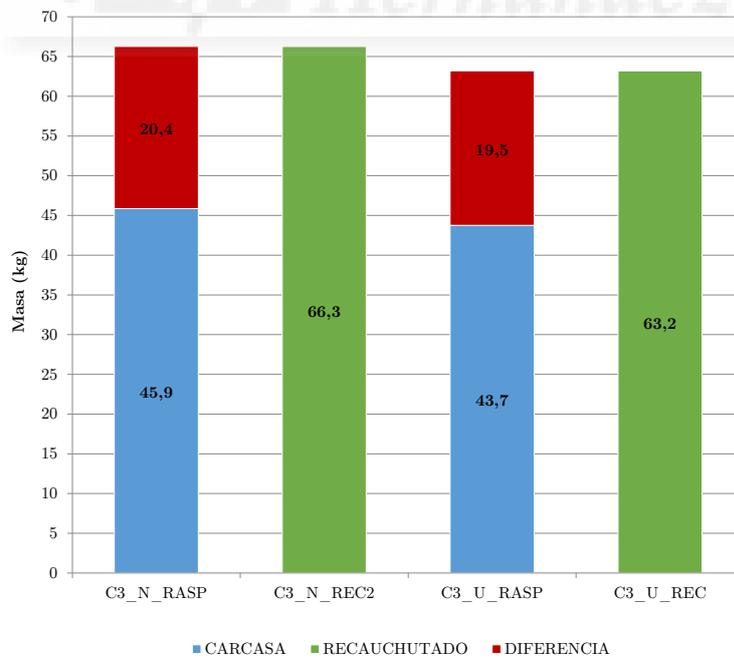
En conclusión, tanto entre neumáticos nuevos y usados, como entre los dos tipos de neumáticos usados, había más diferencia entre las carcassas raspadas que luego tras el recauchutado. Por tanto, podemos concluir, que ha sido más influyente la cantidad de material añadido tras el recauchutado, que el estado de la carcasa o el tipo de carcasa. En este sentido, se

destaca que la cantidad de material añadido tras el recauchutado de las carcacas está cerca de los 20 kg en todos los casos.

No obstante, se ha de recordar que los neumáticos de origen usados son del mismo fabricante y por tanto, no se trata aquí de evaluar la influencia general del tipo de carcasa, lo que requeriría un estudio de una muestra mucho más amplia que incluyera más tipos y fabricantes.



(a) CRR



(b) Masa

Figura 4.6: CRR y Masa de carcaca nuevas y usadas comparadas tras el recauchutado

### Porcentaje de CRR achacable a la carcasa y a la banda

En este punto vamos a analizar el porcentaje de aporte al CRR que tiene la banda y la carcasa en las muestras ensayadas. De la interpretación de los diagramas circulares de la figura 4.7, podemos concluir:

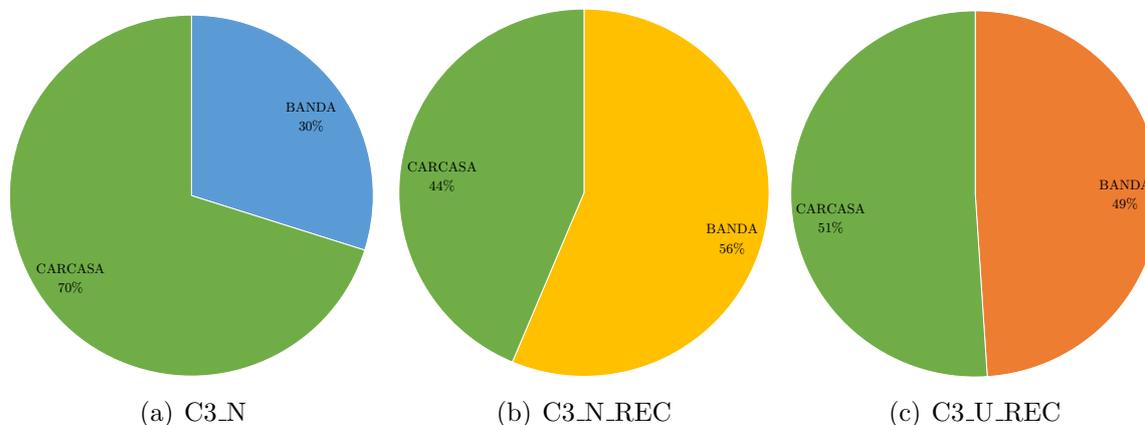


Figura 4.7: Contribución de la banda y la carcasa del neumático al CRR

1. Puede inferirse del resultado obtenido de la muestra nuevas (C3\_N) y las nuevas raspadas (C3\_N\_RASP) que aproximadamente el 70 % de la resistencia a la rodadura del neumático nuevo es debida a las pérdidas que tienen lugar en la carcasa, mientras que sólo el 30 % sería achacable a la deformación del material de la banda de rodadura.
2. Del resultado obtenido entre la muestra nuevas raspadas (C3\_N\_RASP) y recauchutadas (C3\_N\_REC), se deduce que, aproximadamente el 44 % del es debida a las pérdidas en la carcasa, mientras que el 56 % en la nueva banda introducida. En este caso la balanza se equilibra, aunque se decanta ligeramente hacia la banda de rodadura.
3. Haciendo la misma comparación para los neumáticos recauchutados sobre carcassas usadas (C3\_U\_RASP y C3\_U\_REC); el reparto carcasa y banda queda en un 51 % y 49 %, respectivamente. En este caso, la balanza está muy cerca del equilibrio, muy probablemente, como hemos visto en apartados anteriores, debido a que el estado de las carcassas usadas ha tenido una mayor influencia en CRR.

### Comparación con los valores exigidos por la reglamentación

Finalmente, vamos a analizar el valor medio del CRR de todas las muestras recauchutadas en relación con los niveles de exigencia para los neumáticos nuevos según la reglamentación en vigor [1][34], cuyos valores de exigencia y la clases de eficiencia están expuestos en las tablas 2.1 y 2.2 del capítulo 2. Estos niveles de exigencia no son aplicables al recauchutado, aunque esta situación podría cambiar en un futuro.

Cabe remarcar, que los neumáticos recauchutados de este estudio están marcados para uso

en barro y nieve (indicación M+S en los flancos). Para estos neumáticos, el Reglamento permite, excepcionalmente, superar los niveles de exigencia en un valor de 1 N/kN.

Desde el 1 de diciembre de 2012, el CRR de los neumáticos nuevos de clase C3 a la venta o puestos en servicio, no puede exceder de 8 N/kN, o 9 N/kN en el caso de neumáticos M+S, lo que equivale a una clase de eficiencia energética E y F, respectivamente. En este supuesto, cabría indicar que con unos valores entre 7,14 y 7,85 N/kN para todos los neumáticos recauchutados ensayados en este estudio, a día de hoy cumplirían con los requisitos.

Con efectos a partir del 1 de noviembre de 2020, se exigirá que los neumáticos nuevos a la venta o puestos en servicio no superen un CRR de 6,5 N/kN, 7,5 N/kN en el caso de neumáticos M+S, lo que equivale a una clase de eficiencia energética D y E, respectivamente. Ante este otro supuesto, a la vista de los resultados obtenidos en este estudio, muchos de los neumáticos recauchutados ensayados; no cumplirían con las exigencias, no obstante, atendiendo a un valor medio obtenido de 7,6 N/kN, para todos los neumáticos recauchutados, se encontrarían muy cerca.

### **Contribución a la reducción de CO<sub>2</sub>**

Tras haber observado una diferencia del 62 % entre los neumáticos nuevos de origen y los recauchutados sobre carcassas usadas (figura 4.8), seguimos estando lejos de alcanzar valores equivalentes de CRR tras el recauchutado. No obstante, cabe destacar que probablemente la marca de los neumáticos nuevos ensayados son referencia en cuanto a neumáticos de bajo CRR.

Por otro lado, hay que reseñar, que al neumático recauchutado [10], se le permite un diámetro exterior un 1,5 % mayor que la tolerancia permitida en neumáticos nuevos [8]. Gracias a esto, el neumático recauchutado puede tener mayor espesor de banda. Aprovechando esta tolerancia, los usuarios finales exigen al fabricante de neumáticos recauchutado un mayor espesor de banda, para aumentar su duración. Además, se ha demostrado que la influencia del estado de la carcasa y la composición del caucho añadido no es tan grande como la influencia de la cantidad de material aportado tras el recauchutado. Por tanto, si los neumáticos recauchutados tuvieran la misma cantidad de material que los nuevos, los valores del CRR podrían ser más bajos y contribuir en mayor medida a la reducción de emisiones, lo que coincide con la conclusión de algunos autores [44][45]. Lo que no va en contra de que, además, haya que seguir optimizando las propiedades del material añadido y mejorando los procesos de fabricación del neumático recauchutado.

Sin embargo, para valorar la contribución a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, se debería analizar el ciclo de vida completo del neumático, incluyendo las emisiones asociadas a la fabricación de los neumáticos nuevos y recauchutados, y la duración de los mismos debido

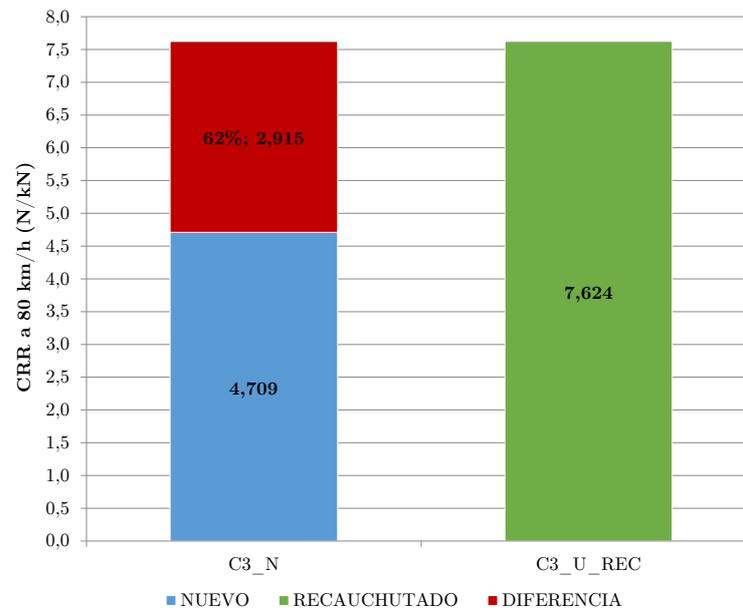


Figura 4.8: Diferencia del CRR entre neumáticos nuevos y neumáticos recauchutados sobre carcadas usadas

al espesor y características de banda, lo que excede de las pretensiones de este estudio.



### 4.3. Ensayos sobre neumáticos de turismo

#### 4.3.1. Ensayos sobre neumáticos nuevos (Fase 1)

En la tabla 4.11, se muestra un resumen de los principales resultados de los neumáticos de turismo nuevos en estado original.

Tabla 4.11: Resultados neumáticos nuevos (Fase 1)

Grupo	Referencia origen	Fecha fabricación	Masa (kg)	Profundidad banda (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura banda (°C)
C1_N1	UMH16EN076	3811	7,1	8,0	8,195	42,4
	UMH16EN077	3811	7,2	7,5	8,075	43,2
	UMH16EN078	1912	7,2	7,0	8,072	43,0
	UMH16EN079	2312	7,1	8,0	7,891	43,0
<b>Promedio</b>			<b>7,2</b>	<b>7,6</b>	<b>8,058</b>	<b>42,9</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>0,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,125</b>	<b>0,4</b>
C1_N2	UMH16EN080	4111	8,0	7,8	9,903	46,1
	UMH16EN081	4011	8,2	8,0	9,492	46,2
	UMH16EN082	1912	8,1	7,6	9,621	45,8
	UMH16EN083	1912	8,0	7,2	9,559	45,7
	<b>Promedio</b>			<b>8,1</b>	<b>7,6</b>	<b>9,644</b>
<b>Desviación estándar</b>			<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,180</b>	<b>0,3</b>

La masa de todos los neumáticos C1\_N1 y C1\_N2, han resultado ser prácticamente coincidentes, con unos valores promedio de 7,2 kg para los y 8,1 kg, respectivamente, como cabía esperar en neumáticos nuevos.

Como puede observarse, los resultados obtenidos para el CRR a 80 km/h en los neumáticos C1\_N1 oscila entre 7,89 y 8,19 N/kN, en todos los casos dentro del rango marcado por el etiquetado de los mismos (clase de eficiencia energética C:  $7,8 \leq \text{CRR} \leq 9$  N/kN). Por otro lado, para los neumáticos C1\_N2, el CRR a 80 km/h oscila entre 9,49 y 9,90 N/kN. Valores que se encuentran, en todos los casos, dentro del rango para clase de eficiencia energética E ( $9,1 \leq \text{CRR} \leq 10,5$  N/kN). En este caso, las desviaciones y la separación ente las medias de los grupos, nos permite tomar los valores promedio de 8,10 y 9,64 N/kN, como valores representativos del CRR a 80 km/h, de los tipos de neumático C1\_N1 y C1\_N2, respectivamente.

Por último, de la temperatura máxima alcanzada en la zona de la banda para C1\_N1 y C2\_N2, se obtienen unos valores medios de 42,9 y 45,9°C, con unas varianzas calculadas de 0,4 y 0,1°C, respectivamente, y una diferencia entre ellos de 3°C. Estos valores tendrán interés, para la comparación con los resultados obtenidos en los ensayos posteriores.

#### 4.3.2. Ensayos sobre carcassas nuevas raspadas (Fase 2)

En la tabla 4.12, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la rodadura sobre todas las carcassas de la fase anterior raspadas, y no recauchutadas.

Tabla 4.12: Resultados carcasas nuevas (Fase 2)

Grupo	Referencia origen	Referencia raspado	Fecha raspado	Masa (kg)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura banda (°C)
C1_N1_RASP	UMH16EN076	UMH17EN001	0417	5,0	5,632	35,5
	UMH16EN077	UMH17EN002	0417	4,9	5,567	34,9
	UMH16EN078	UMH17EN003	0417	5,0	5,780	---
	UMH16EN079	UMH17EN004	0417	5,0	5,811	---
<b>Promedio</b>				<b>5,0</b>	<b>5,698</b>	<b>35,2</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0,0</b>	<b>0,117</b>	<b>0,4</b>
C1_N2_RASP	UMH16EN080	UMH17EN005	0417	5,8	7,046	37,3
	UMH16EN081	UMH17EN006	0417	6,0	6,790	---
	UMH16EN082	UMH17EN007	0417	5,8	6,905	37,5
	UMH16EN083	UMH17EN008	0417	5,9	7,017	37,2
<b>Promedio</b>				<b>5,9</b>	<b>6,939</b>	<b>37,3</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0,1</b>	<b>0,117</b>	<b>0,2</b>

El interés de estos ensayos radica, en su posible utilidad para estimar la parte de la resistencia a la rodadura que es debida a la carcasa, y que parte es aportada por la banda de rodadura.

De las 4 carcasas nuevas raspadas C1\_N1\_RASP y C1\_N2\_RASP que se han ensayado, se han obtenido unos valores medios de CRR de 5,70 y 6,94 N/kN, con unas desviaciones igual a 0,12 N/kN. Además, la separación entre las medias de los grupos nos permite tomar el valor promedio de cada uno, como valor representativo del CRR a 80 km/h de estos tipos de neumático.

### 4.3.3. Ensayos sobre neumáticos nuevos recauchutados (Fase 3)

En la tabla 4.13, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos sobre los 8 neumáticos recauchutados.

Tabla 4.13: Resultados neumáticos recauchutados sobre carcasas nuevas (Fase 3)

Grupo	Referencia origen	Referencia recauchutado	Fecha raspado	Masa (kg)	Profundidad banda (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura banda (°C)
C1_N1_REC	UMH16EN076	UMH17EN014	0717	8,3	8,9	9,899	47,2
	UMH16EN077	UMH17EN015	0717	8,2	8,9	10,108	46,6
	UMH16EN078	UMH17EN016	0717	8,2	8,3	9,946	44,8
	UMH16EN079	UMH17EN017	0717	8,1	8,4	9,653	43,3
<b>Promedio</b>				<b>8,2</b>	<b>8,6</b>	<b>9,901</b>	<b>45,5</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,188</b>	<b>1,8</b>
C1_N2_REC	UMH16EN080	UMH17EN018	0717	9,2	8,0	11,862	---
	UMH16EN081	UMH17EN019	0717	9,6	8,3	11,921	46,8
	UMH16EN082	UMH17EN020	0717	9,5	7,3	11,897	46,5
	UMH16EN083	UMH17EN021	0717	9,4	6,7	12,348	46,1
<b>Promedio</b>				<b>9,4</b>	<b>7,6</b>	<b>12,007</b>	<b>46,5</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0,2</b>	<b>0,7</b>	<b>0,229</b>	<b>0,4</b>

Como puede observarse, la desviación obtenida en el CRR para cada grupo de neumáticos recauchutado, es del orden del doble que los neumáticos nuevos y las carcasas raspadas, lo que puede ser síntoma de las irregularidades introducidas en el proceso de fabricación de

los neumáticos recauchutados. Los valores máximos y mínimos, así como la desviación del grupo C1\_N2\_REC, sugieren mayores irregularidades en estas muestras.

En cualquier caso, son valores que distinguen claramente los dos grupos. De una primera observación de los valores medios de CRR a 80 km/h obtenidos, puede concluirse, que en todos los casos los neumáticos recauchutados sobre carcassas nuevas (C1\_N1\_REC), presentan valores de resistencia a la rodadura entre 9,65 y 10,12 N/kN, lo que los situaría en la parte superior de la clase de eficiencia energética E, según el Reglamento (CE) 1222/2009[34] (valores entre 9,1 y 10,5 N/kN). Por otro lado, los neumáticos recauchutados sobre carcassas nuevas (C1\_N2\_REC), presentan un valor promedio del CRR de 12,00 N/kN, lo que los situaría en la parte superior de la clase de eficiencia energética F, según el Reglamento (CE) 1222/2009[34] (valores entre 10,6 y 12,0 N/kN). De este último grupo, distinguiremos un neumático, por aumentar su CRR a 12,35 N/kN, lo que lo sitúa en la clase G (valores mayores que 12,1 N/kN).

Respecto a la máxima temperatura superficial medida en la zona de la banda, observamos que los valores promedios de los dos grupos difieren en 1°C. Esta diferencia, es menor que la encontrada entre los neumáticos de partida (3°C) y entre sus carcassas raspadas (2°C). También se ha observado una disminución de la dispersión de los resultados que, puede haberse debido, a que se han usado el mismo compuesto y molde para el recauchutado de las muestras y por esto, se han obtenido unas temperaturas más homogéneas. No obstante, comparando los valores de temperatura y CRR por cada neumático, al menos en las condiciones en las que se ha medido la temperatura, no parece haber una correlación clara del CRR con la temperatura de la banda, en la zona en la que se ha medido.

#### 4.3.4. Ensayos sobre neumáticos usados (Fase 1)

En la tabla 4.14, se muestra un resumen de los principales resultados de los ensayos sobre los neumáticos usados.

Tabla 4.14: Resultados neumáticos usados (Fase 1)

Grupo	Referencia origen	Fecha fabricación	Masa (kg)	Profundidad banda (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura banda (°C)
C1_U	UMH16EN060	1110	6,1	4,3	6,421	37,1
	UMH16EN061	1210	6,3	4,1	6,809	38,5
	UMH16EN062	1110	6,3	4,3	6,287	38,0
	UMH16EN063	1110	6,2	4,0	6,320	37,8
		<b>Promedio</b>	<b>6,2</b>	<b>4,2</b>	<b>6,459</b>	<b>37,8</b>
		<b>Desviación estándar</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,240</b>	<b>0,6</b>

Como puede apreciarse, la dispersión es significativamente mayor que en los ensayos realizados sobre neumáticos nuevos C1\_N1, obteniéndose una desviación el doble de grande y por tanto, pueden no representar un valor de conjunto. Esta diferencia, se achaca, principalmente,

al espesor residual de la banda y al desgaste irregular del neumático.

Estos neumáticos han pertenecido a un mismo vehículo y han realizado algo más de 70000 km, por lo que en principio, el grado de desgaste debería ser parecido, pero debido a la conducción, a desajustes en la alineación o diferentes presiones de inflado de los neumáticos, el grado de desgaste puede haber sido irregular. Además, se tomaron medidas de la profundidad del dibujo residual y se han observado, que los valores están entre 3,6 y 4,25 mm, lo que muestra indicios de un grado de desgaste diferente.

En cualquier caso cabe destacar, que los CRR de todos los neumáticos son inferiores a los valores obtenidos para los neumáticos nuevos. Este efecto, es consecuencia de la menor cantidad de material en la banda de rodadura y por tanto, de la menor cantidad de energía generada por histéresis en cada ciclo de deformación de la misma.

Por otra parte, si observamos los valores de CRR en función de la profundidad, no se puede apreciar la influencia del grado de desgaste. En general, la literatura indica, que con el grado de desgaste, el CRR debería disminuir, pero esto ha sido probado principalmente en neumáticos de camión, y para sacar conclusiones en este sentido para muestras de turismo, deberíamos realizar un estudio más amplio.

En cuanto a la temperatura superficial medida en la zona de la banda, se observa que la dispersión es pequeña y no parece haberse visto afectado por el grado de desgaste de estos neumáticos.

#### 4.3.5. Ensayos sobre carcasas usadas raspadas (Fase 2)

En la tabla 4.15, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la rodadura sobre carcasas usadas antes de ser recauchutadas.

Tabla 4.15: Resultados carcasas usadas (Fase 2)

Grupo	Referencia origen	Referencia recauchutado	Fecha raspado	Masa (kg)	Profundidad banda (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura banda (°C)
C1_U_RASP	UMH16EN060	UMH17EN009	0417	4,8	---	5,171	36,2
	UMH16EN061	UMH17EN010	0417	5,0	---	5,221	---
	UMH16EN062	UMH17EN011	0417	4,8	---	4,913	34,8
	UMH16EN063	UMH17EN012	0417	4,9	---	5,160	34,0
	Promedio			<b>4,9</b>	---	<b>5,116</b>	<b>35,0</b>
	Desviación estándar			<b>0,1</b>	---	<b>0,138</b>	<b>1,1</b>

En este caso, la dispersión encontrada es del orden de la mitad de la encontrada en los neumáticos de camión, fruto de la procedencia y utilización de estos neumáticos, lo que nos permite escoger el valor promedio de 5,12N/kN, como valor representativo de esta muestra.

### 4.3.6. Ensayos sobre neumáticos usados recauchutados (Fase 3)

En la tabla 4.16, se muestra un resumen de los principales resultados de los ensayos sobre los neumáticos de turismo usados recauchutados.

Tabla 4.16: Resultados neumáticos recauchutados sobre carcasas usadas (Fase 3)

Grupo	Referencia origen	Referencia recauchutado	Fecha fabricación	Masa (kg)	Profundidad banda (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura banda (°C)
C1_U_REC	UMH16EN060	UMH17EN022	0717	8,2	9,1	10,069	44,1
	UMH16EN061	UMH17EN023	0717	8,1	8,1	9,434	42,9
	UMH16EN062	UMH17EN024	0717	8,1	8,9	9,902	43,7
	UMH16EN063	UMH17EN025	0717	8,0	8,0	9,391	42,4
	<b>Promedio</b>			<b>8,1</b>	<b>8,5</b>	<b>9,699</b>	<b>43,3</b>
	<b>Desviación estándar</b>			<b>0,1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,338</b>	<b>0,7</b>

Los valores del CRR a 80 km/h obtenidos para esta muestra de neumáticos recauchutados, varían entre 9,39 y 10,07 N/kN. Por un lado, la desviación estándar del CRR, ha resultado ser elevada y la diferencia observada entre los valores máximos y mínimos, es grande. Por otro lado, el material añadido en todos los neumáticos ha sido el mismo y la temperatura de la banda no presenta grandes diferencias. Estas dos cuestiones, sugieren grandes diferencias entre los neumáticos, tal vez debidos a, que el estado de fatiga de las carcasas de partida, pueden haber sido diferentes y/o tal vez debido a, que en el proceso de fabricación de los neumáticos recauchutados, se han introducido irregularidades que puedan haberse convertido en mayores pérdidas.

Cabe señalar, que las diferencias de fatiga de las carcasas, se pueden relacionar con que se observan dos grupos de dos neumáticos con valores cerca de 10 N/kN y 9,4 N/kN, lo que puede ser reflejo de la igualdad del estado de sus carcasas, probablemente por haber coincidido en el mismo eje durante su uso.

En cualquier caso, aunque la desviación de los datos es mayor que en los neumáticos nuevos recauchutados, existe una diferencia significativa del valor medio de este grupo con respecto a las muestras de partida y las carcasas raspadas de las mismas. Por ello, se considera apropiado escoger el valor medio de CRR de 9,70 N/kN, como valor medio representativo de esta muestra.

### 4.3.7. Análisis comparativo de los resultados de turismo

En este punto analizaremos las diferencias entre los valores medios de las muestras en diferentes estados, ya sean nuevos o usados: origen o de partida (fase 1), raspados (fase 2) y recauchutados (fase 3). Para las conclusiones obtenidas, nos apoyaremos del resumen de resultados de la tabla 4.17 y de las gráficas de barras de la figura 4.9, así como de otros recursos particularizados para cada apartado.

Tabla 4.17: Resultados neumáticos recauchutados sobre carcassas usadas (Fase 3)

Estado	Fase	Muestra	Masa (kg)	Profundidad banda (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)	Temperatura banda (°C)
NUEVO	1	C1_N1	7,2	7,6	8,058	42,9
		C1_N2	8,1	7,6	9,644	45,9
	2	C1_N1_RASP	5,0	---	5,698	35,2
		C1_N2_RASP	5,9	---	6,939	37,3
	3	C1_N1_REC	8,2	8,6	9,901	45,5
		C1_N2_REC	9,4	7,6	12,007	46,5
USADO	1	C1_U	6,2	4,2	6,459	37,8
	2	C1_U_RASP	4,9	---	5,116	35,0
	3	C1_U_REC	8,1	8,5	9,699	43,3

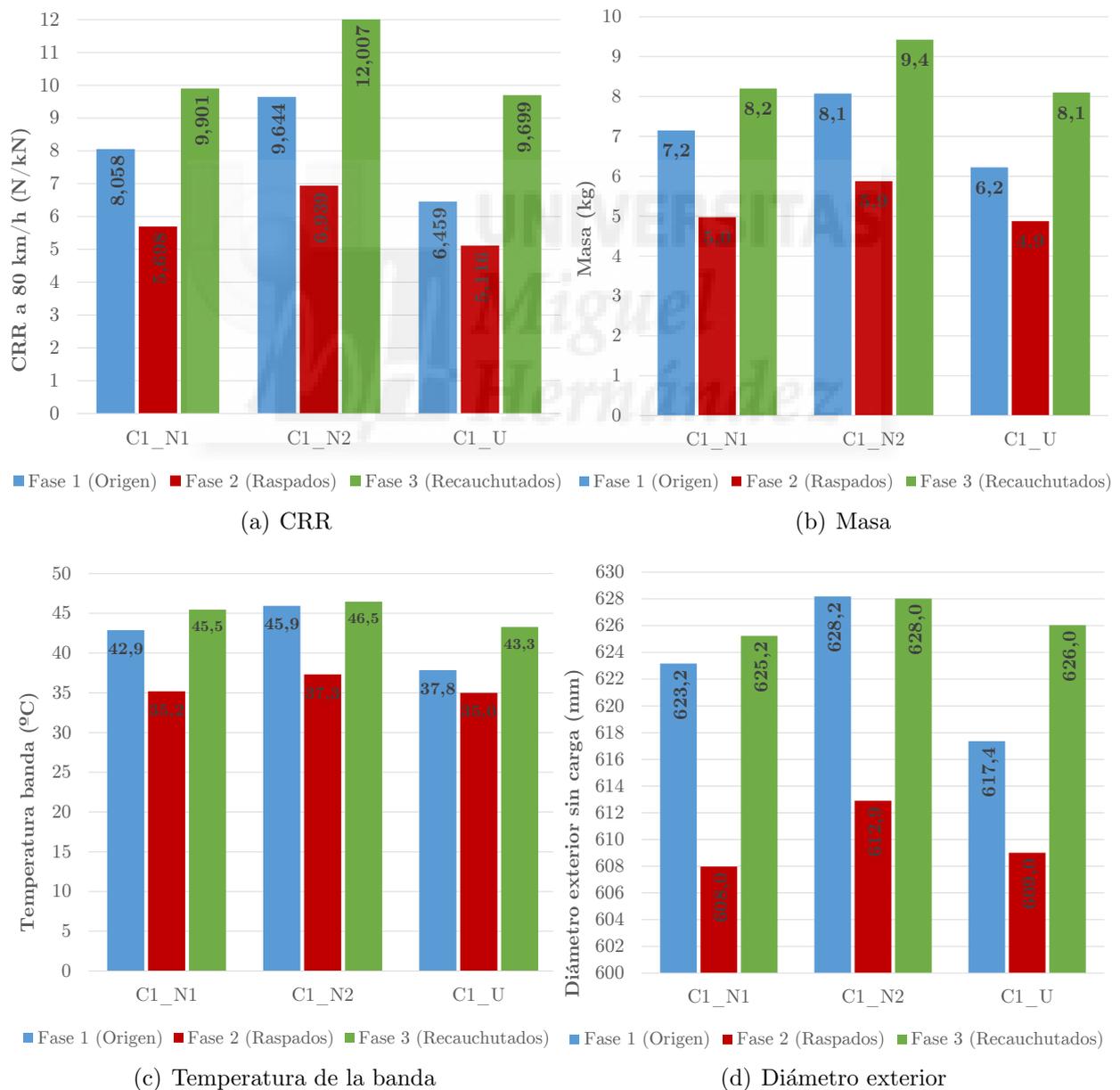


Figura 4.9: Principales propiedades entre fases

### Comparación del CRR entre los neumáticos nuevos y los recauchutados

Con el mismo objetivo que las muestras de camión de no tener en cuenta la influencia de la carcasa usada, analizaremos la diferencia que hay entre los neumáticos nuevos y estos mismos recauchutados. Si comparamos el resultado de la muestra de neumáticos nuevos (C1\_N1 y C1\_N2) con los neumáticos recauchutados (C1\_N1\_REC y C1\_N2\_REC), podemos observar en la figura 4.10, que se incrementa el CRR un 23 % y 25 %, respectivamente. Este aumento en el CRR, puede ser debido también, a la diferencia de prestaciones de los nuevos compuestos introducidos en la banda de rodadura, respecto a los originales, y a la influencia la cantidad de material en la banda de rodadura, que hace que los neumáticos recauchutados tengan una masa media 1,2 kg, superior a los nuevos.

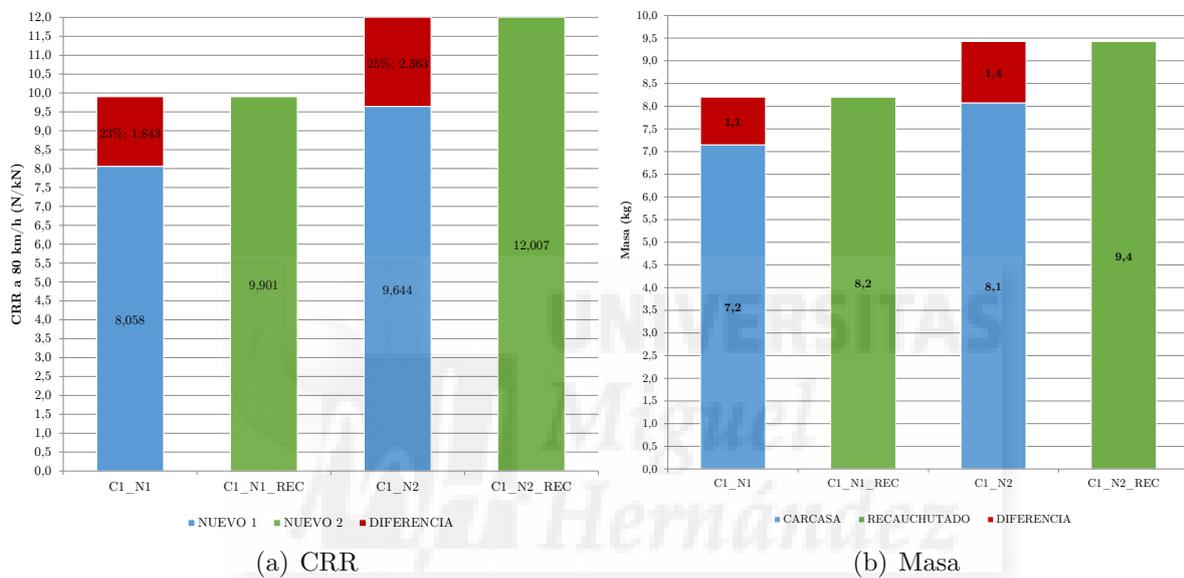


Figura 4.10: CRR y la masa entre neumáticos nuevos y recauchutados

Cabe señalar, que los neumáticos recauchutados de carcassas usadas (C1\_U\_REC), tienen valores muy próximos a los valores observado en los neumáticos nuevos de segundo fabricante (C1\_N2).

### Diferencias encontradas entre las dos marcas estudiadas

A continuación, analizaremos las muestras nuevas del primer (C1\_N1) y del segundo fabricante (C1\_N2), figura 4.11. La principal conclusión surge, de la diferencia de CRR encontrada entre carcassas raspadas nuevas del primer y segundo fabricante, debido a que han resultado tener una diferencia en torno al 22 % y esta diferencia se mantiene una vez recauchutadas estas mismas carcassas (21 %). En este caso, ambas muestras provienen de neumáticos nuevos sin utilizar, la única diferencia reside en que son de distinto fabricante, por lo que la estructura y geometría de las carcassas son diferentes. Esto nos lleva a la conclusión, junto con los porcentajes observados en el apartado anterior, de que, tras el recauchutado, da la impresión que en ambos casos la contribución al aumento de CRR de la banda de rodadura

y la carcasa ha sido casi la misma.

Volviendo a la figura 4.10, observando la diferencia encontrada entre el CRR de los neumáticos de partida y estos mismos tras el recauchutado, de un 23 % y 25 % para el fabricante uno y dos, respectivamente. Por otro parte, podríamos achacar valores de influencia mayores en el segundo fabricante también debidos al tipo de carcasa.

Se ha observado, además, viendo la tabla 4.17 y la figura 4.9 (b), que en el proceso de raspado ambas muestras (C1\_N1\_RASP y C1\_N2\_RASP), han disminuido su masa en 2,2 kg, por término medio. Este hecho, junto a que, se ha eliminado tras el raspado y añadido a continuación en el recauchutado, casi la misma cantidad del mismo compuesto, demuestran que la principal variabilidad de los resultados, es debida a la influencia del tipo de carcasa y/o fabricante.

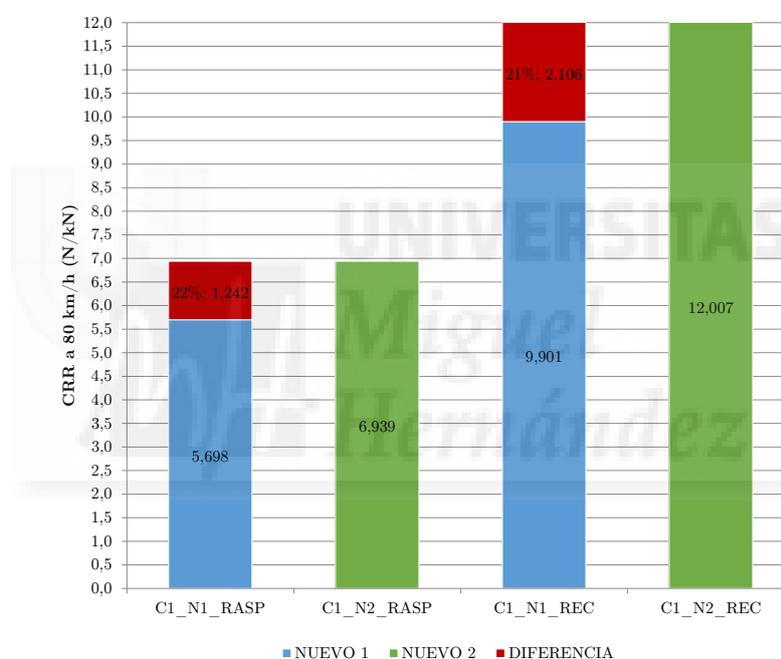


Figura 4.11: CRR entre fabricantes

De estas gráficas, cabe también destacar, que las muestras recauchutadas del primer fabricante (C1\_N1\_REC), casi igualan los valores de CRR de los neumáticos nuevos del segundo fabricante (C1\_N2). Por tanto, podemos encontrar en el mercado neumáticos de igual dimensiones, nuevos y recauchutados, que cumplen con las mismas expectativas en cuanto a consumo energético.

### Influencia del estado de la carcasa y su masa en el CRR

A continuación, analizaremos el valor añadido al CRR tras el recauchutado y el factor de influencia de la carcasa y la cantidad de masa agregada, comparando los neumáticos nuevos y usados del mismo fabricante, figura 4.12 (a). En este caso, el valor medio de CRR obtenido en

los ensayos sobre carcassas usadas raspadas (C1\_U\_RASP), es un 10 % inferior al obtenido con las carcassas nuevas (C1\_N1\_RASP). Esta influencia, se ve reflejada también en el resultado obtenido al ensayar los neumáticos recauchutados sobre las carcassas anteriores. Aunque en este caso, el efecto es menor, siendo el valor medio del CRR de los neumáticos usados recauchutados (C1\_U\_REC), un 2 % inferior al obtenido para los recauchutados con el mismo compuesto sobre carcassas nuevas (C1\_N1\_REC).

Cabe destacar, que el efecto es contrario a lo observado para las muestras de camión analizadas, y debido a esto, podría no ser posible ver con claridad el efecto del estado de la carcassa. Por otro lado, este resultado está en consonancia con algunos autores [44], que destacan que el valor del CRR de un neumático usado, es inferior al CRR de un neumático nuevo raspado a la misma profundidad de banda. Pero hay que añadir, que en este caso, puede haber influido que el índice de velocidad de las carcassas usadas, “T” (190km/h), es inferior al de las carcassas nuevas utilizadas, “H” (210 km/h), lo que puede reflejar una diferencia en la estructura interna entre las carcassas, que produzca que las carcassas usadas generen menos pérdidas por histéresis.

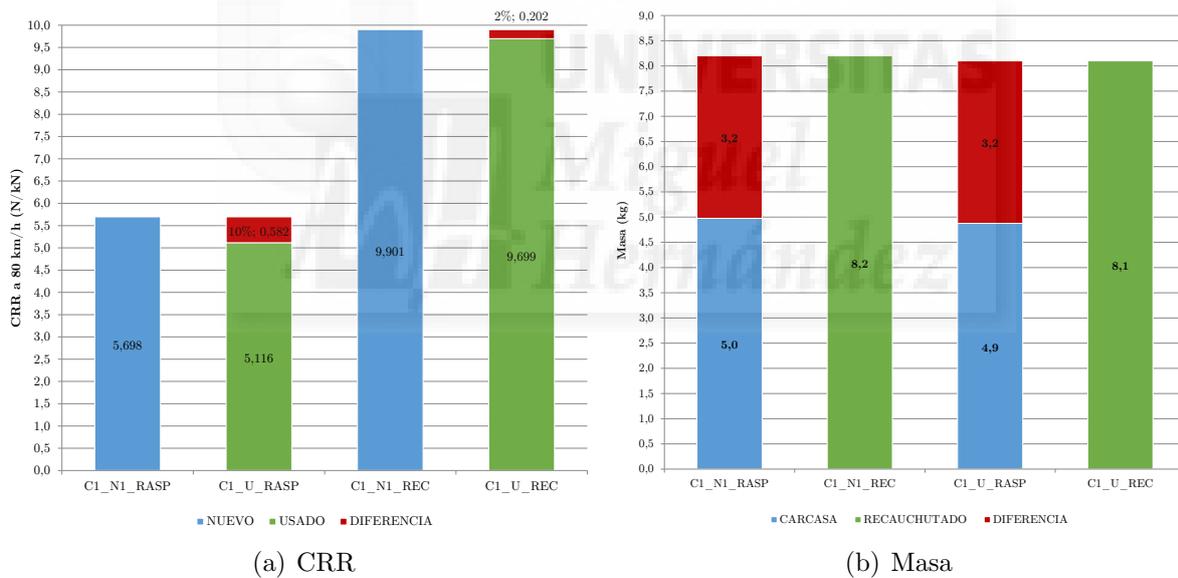


Figura 4.12: CRR y masa entre los mismos fabricantes

Por otro lado, viendo la figura 4.12 (b), podemos ver, que las carcassas usadas raspadas tiene una masa media 0,1 kg menor que las nuevas raspadas, valor que también se ve reflejado con la misma magnitud tras el recauchutado. Lo que supone, que tras el proceso de recauchutado, se ha añadido la misma cantidad promedio de masa (3,2 kg) sobre las carcassas de ambas muestras.

Finalmente, viendo las dos imágenes de la figura 4.12, podemos observar, que aunque la diferencia entre las masas es la misma antes y después del recauchutado, y la cantidad de material añadido es el mismo, la influencia de la masa en el CRR no ha resultado la misma entre las carcassas nuevas y usadas, que entre los neumáticos recauchutados sobre las

mismas, siendo mayor la diferencia observada en las carcassas. Lo que puede indicar, que la causa principal de esta pequeña diferencia, es el tipo y/o estado de la carcassa y que este efecto, se disipa tras el recauchutado de las muestras.

En vista a estos resultados, podemos concluir, que comparando neumáticos nuevos con estos mismos una vez raspados y recauchutados, se ha demostrado que la masa es el principal factor de influencia en el aumento de CRR, y que comparando neumáticos nuevos recauchutados y usados recauchutados con sus carcassas, el tipo y/o estado de la carcassa de partida, es el segundo factor de influencia en la variación del CRR, aunque en menor medida.

### Porcentaje de CRR achacable a la carcassa y a la banda

En este punto vamos a analizar el porcentaje de aporte al CRR que tiene la banda y la carcassa en las muestras ensayadas. De la interpretación de los diagramas circulares de la figura 4.13, podemos concluir:

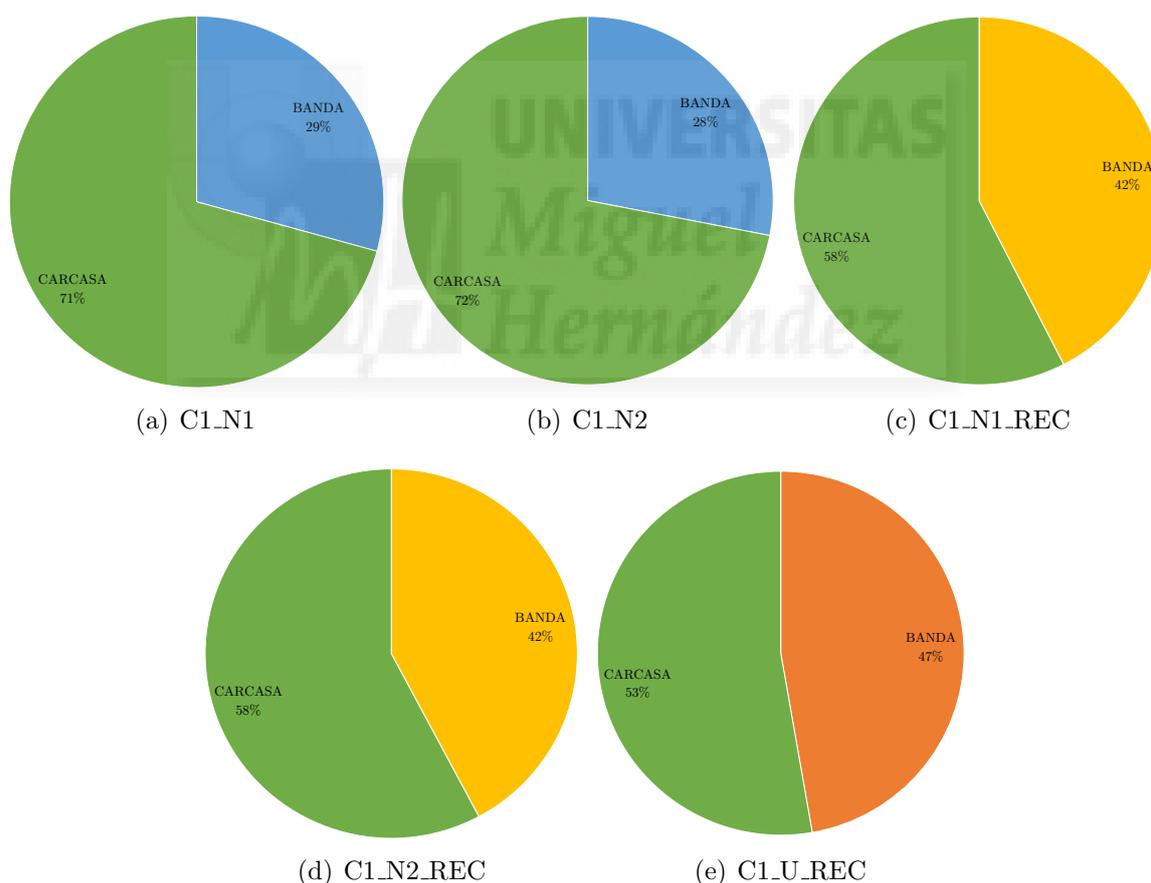


Figura 4.13: Contribución de la banda y la carcassa del neumático al CRR

1. Del resultado obtenido de la muestra nuevas (C1.N1) y las nuevas raspadas (C1.N1.RASP) puede deducirse que el 71 % de la resistencia a la rodadura del neumático nuevo es debida a las pérdidas que tienen lugar en la carcassa, mientras que sólo el 29 % sería achacable a la deformación del material de la banda de rodadura. De igual modo, con unos valores muy similares del 72 % y 28 %, se puede deducir esto mismo de las muestras del segundo

fabricante (C1\_N2 y C1\_N2\_RASP). Cabe destacar que los porcentajes de CRR achacable a la carcasa y a la banda de los neumáticos nuevos de turismo son del mismo orden de magnitud que el obtenido en los de camión.

2. Para el resultado obtenido en las muestras nuevas raspadas y recauchutadas (C1\_N1\_REC y C1\_N2\_REC) comparamos con las carcasas raspadas (C1\_N1\_RASP y C1\_N2\_RASP), puede desprenderse de ambas muestras que el 42 % del CRR es debido a las pérdidas en la carcasa, mientras que el 58 % es debido a la nueva banda introducida. En este caso la balanza se equilibra un poco, decantándose un 8 % hacia la banda de rodadura.
3. Haciendo la misma comparación para los neumáticos usados (C1\_U\_REC y C1\_U\_RASP) el reparto carcasa y banda queda en un 47 % y 53 %, respectivamente. En este caso la balanza se equilibra un poco más, muy probablemente debido a que el estado las carcasas usadas han tenido mayor influencia en CRR que en el caso de usar carcasas nuevas. A diferencia de los ensayos en camión, en este caso la influencia es menor, debido quizás a la diferencia encontrada en apartados anteriores, donde las carcasas usadas han resultado tener un valor inferior a las nuevas.

### Comparación con los valores exigidos por la reglamentación

Finalmente, de igual modo que en las muestras de camión, vamos a analizar el valor medio del CRR de todas las muestras recauchutadas, en relación con los niveles de exigencia para los neumáticos nuevos, según la reglamentación en vigor [1][34], cuyos valores de exigencia y la clases de eficiencia están expuestos en las tablas 2.1 y 2.2 del capítulo 2.

En las muestras analizadas, no se han encontrado indicaciones para nieve y barro, por lo que, en este caso, no se puede aplicar ninguna excepción.

Desde el 1 de diciembre de 2012, el CRR de los neumáticos nuevos de clase C1 a la venta o puestos en servicio, no podrá exceder de 12 N/kN, lo que equivale a una clase de eficiencia energética F. En este supuesto, cabría indicar, que con unos valores entre 9,39 y 10,1 N/kN para todos los neumáticos recauchutados ensayados del primer fabricante (C1\_N1\_REC y C1\_U\_REC), y todas las muestras recauchutadas del segundo fabricante (11,86-11,92 N/kN), salvo una (12,35 N/kN) C1\_N2\_REC), a día de hoy, cumplirían con los requisitos.

Con efectos a partir del 1 de noviembre de 2020, la exigencia toma el valor 10,5 N/kN, lo que equivale a una clase de eficiencia energética E. En el caso de encontrarnos ante este requisito, tenemos que destacar, que las muestras recauchutadas sobre carcasas del primer fabricante también cumplirían requisitos, pero las recauchutadas sobre carcasas del segundo fabricante, no. Destacar, que en este caso, son neumáticos nuevos recauchutados y que, si se recauchutan una vez usados, sería incierto predecir su tendencia.

## Contribución a la reducción de CO<sub>2</sub>

Tras haber observado una diferencia del 23-25 %, entre los neumáticos nuevos de origen y los recauchutados sobre carcassas usadas (figura 4.10), podemos observar, que todavía se está lejos de alcanzar valores equivalentes de CRR tras el recauchutado. Cabe destacar, que probablemente, los neumáticos nuevos de origen del primer fabricante (C1\_N1), son referencia en cuanto a neumáticos de bajo CRR y la tendencia para contribuir en la reducción de emisiones CO<sub>2</sub>, sería conseguir valores próximos de CRR en los neumáticos recauchutados.

Hay que reseñar, que el neumático recauchutado de turismo no permite añadir mayor cantidad de banda de rodadura, como pasa en los de camión. Aun así, dentro de los intervalos de tolerancia permitidos, puede haber variaciones de diámetro exterior entre un 4-8 % [9]. Por un lado, se ha demostrado la influencia de la masa en el CRR de los neumáticos recauchutados y por el otro la influencia del tipo de carcassa. En este caso, parece lógico tratar de seguir optimizando las propiedades del material añadido y mejorando los procesos de fabricación del neumático recauchutado, y además sería recomendable tratar de clasificar los neumáticos de partida antes de recauchutar, escogiendo las carcassas que puedan contribuir a obtener un menor CRR.

No obstante, de manera similar que, en camión, para valorar la contribución a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> se debería analizar el ciclo de vida completo del neumático, incluyendo las emisiones asociadas a la fabricación de los neumáticos nuevos y recauchutados, y la duración de los mismos debido al espesor y características de banda, lo que excede de las pretensiones de este estudio.

## 4.4. Análisis estadístico de los resultados

### Pruebas de normalidad

En primer lugar, se ha analizado el grado de ajuste de cada una de las muestras a una distribución normal. Los análisis estadísticos completos los podemos ver en el anexo C, a continuación, se muestran en las tablas 4.18 y 4.19, el resumen de los resultados para turismo y camión. A continuación, en las figuras 4.15 y 4.14, los gráficos que representan el grado de ajuste de estos valores al valor normal esperado.

El contraste de hipótesis utilizando para las muestras con un número de neumáticos mayor o igual a 5, es el estadístico de Kolmogorov-Smirnov para una muestra, que mide el grado de ajuste a una distribución normal. Para las muestras en los que el número de neumáticos sea inferior se utilizará el estadístico de Shapiro-Wilk para medir el grado de ajuste a una distribución normal, usado habitualmente para muestras de tamaño inferior a 50.

Tras analizar el grado de significación de los resultados de estas pruebas, viendo que este

Tabla 4.18: Resultados pruebas de normalidad muestras de camión

Repetición y media		C3 N	C3 N RASP	C3 N REC1	C3 N REC2	C3 N REC3	C3 N REC4	C3 U	C3 U RASP	C3 U REC
Tamaño de las muestras		12	3	3	3	3	3	6	6	6
Parámetros normales (a,b)	Media	4,709	3,302	7,563	7,255	7,633	7,790	4,000	3,891	7,624
	Desviación típica	0,077	0,093	0,032	0,102	0,039	0,065	0,336	0,341	0,118
Diferencias más extremas	Absoluta	0,201	0,178	0,374	0,280	0,297	0,241	0,270	0,195	0,290
	Positiva	0,201	0,178	0,271	0,205	0,214	0,193	0,270	0,154	0,290
	Negativa	-0,162	-0,177	-0,374	-0,280	-0,297	-0,241	-0,201	-0,195	-0,165
Z (Kolmogorov-Smirnov)		0,201	0,178	0,374	0,280	0,297	0,241	0,270	0,195	0,290
$\alpha$ (Kolmogorov-Smirnov)		0,193	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	0,197	0,200	0,125
W (Shapiro-Wilk)		0,985	0,999	0,777	0,938	0,917	0,973	0,989	0,994	0,835
$\alpha$ (Shapiro-Wilk)		0,768	0,956	0,060	0,519	0,442	0,687	0,802	0,853	0,202
$\zeta$ SE CUMPLE LA HIPÓTESIS		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI (c)	SI (c,e)	SI (c)

a. La distribución de prueba es normal.  
 b. Se calcula a partir de datos.  
 c. Corrección de significación de Lilliefors.  
 d. La significación no se puede calcular porque la suma de las ponderaciones de casos es menor que 5.  
 e. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

Tabla 4.19: Resultados pruebas de normalidad muestras de turismo

Repetición y media		C1 N1	C1 N1 RASP	C1 N1 REC	C1 N2	C1 N2 RASP	C1 N2 REC	C1 U	C1 U RASP	C1 U REC
Tamaño de las muestras		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Parámetros normales (a,b)	Media	8,058	5,698	9,901	9,644	6,939	12,007	6,459	5,116	9,699
	Desviación típica	0,125	0,117	0,188	0,180	0,117	0,229	0,240	0,138	0,338
Diferencias más extremas	Absoluta	0,294	0,260	0,244	0,301	0,247	0,396	0,313	0,375	0,283
	Positiva	0,196	0,212	0,157	0,301	0,181	0,396	0,313	0,224	0,283
	Negativa	-0,294	-0,260	-0,244	-0,200	-0,247	-0,262	-0,236	-0,375	-0,225
Z (Kolmogorov-Smirnov)		0,294	0,260	0,244	0,301	0,247	0,396	0,313	0,375	0,283
$\alpha$ (asintótica bilateral)		(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)
W (Shapiro-Wilk)		0,930	0,901	0,966	0,875	0,925	0,730	0,816	0,797	0,862
$\alpha$ (Shapiro-Wilk)		0,593	0,437	0,817	0,318	0,567	0,024	0,135	0,097	0,269
$\zeta$ SE CUMPLE LA HIPÓTESIS		SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI

a. La distribución de prueba es normal.  
 b. Se calcula a partir de datos.  
 c. Corrección de significación de Lilliefors.  
 d. La significación no se puede calcular porque la suma de las ponderaciones de casos es menor que 5.

es mayor que el nivel de confianza establecido en 0,05, se podría aceptar que la mayoría de los datos siguen una distribución normal. Igualmente, en los casos que no ha resultado significativo, se ha considerado que la muestra posee características similares a las otras poblaciones estudiadas. Por tanto, conociendo que las muestras se han medido y tratado de igual forma e igual método de ensayo que el resto de muestras que sí han mostrado significación, incluidas las de mayor tamaño, se decide suponer normalidad en estos conjuntos de datos. Esta consideración puede llevar a asumir algún tipo de error que deberá tenerse presente para las conclusiones obtenidas.

Asumir un comportamiento normal de los datos, nos permitirá utilizar el valor medio y analizar el grado de dispersión a través de la desviación estándar para caracterizar el comportamiento de las muestras, tal como se ha hecho en los apartados anteriores. Adicionalmente, las pruebas de normalidad, junto con las pruebas de homogeneidad de las varianzas, son un paso previo que se debe cumplir si vamos a realizar pruebas de contraste entre dos o más muestras (como ANOVA, posprocesados tipo Tukey y pruebas T-Student) para garantizar la validez del análisis comparativo realizado.

En los ensayos para los grupos con tamaños de muestra de 12 neumáticos el resultado se

considera perfectamente válido. No obstante, para tamaños de muestra de 6 o menos la validez de las herramientas estadísticas puede ser discutible como en el caso de C3\_N2\_REC.

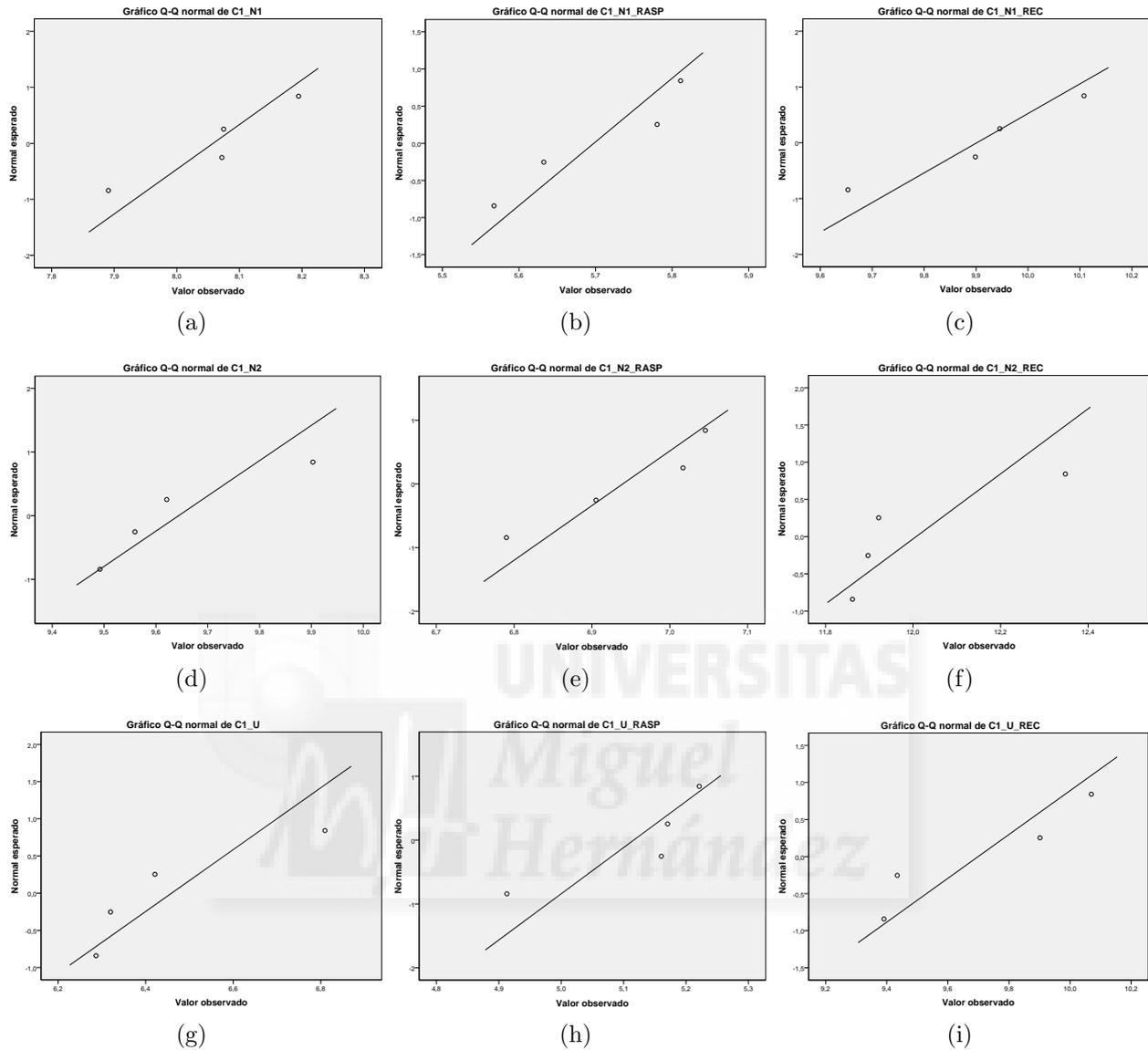


Figura 4.14: Gráficas de contraste de normalidad turismo

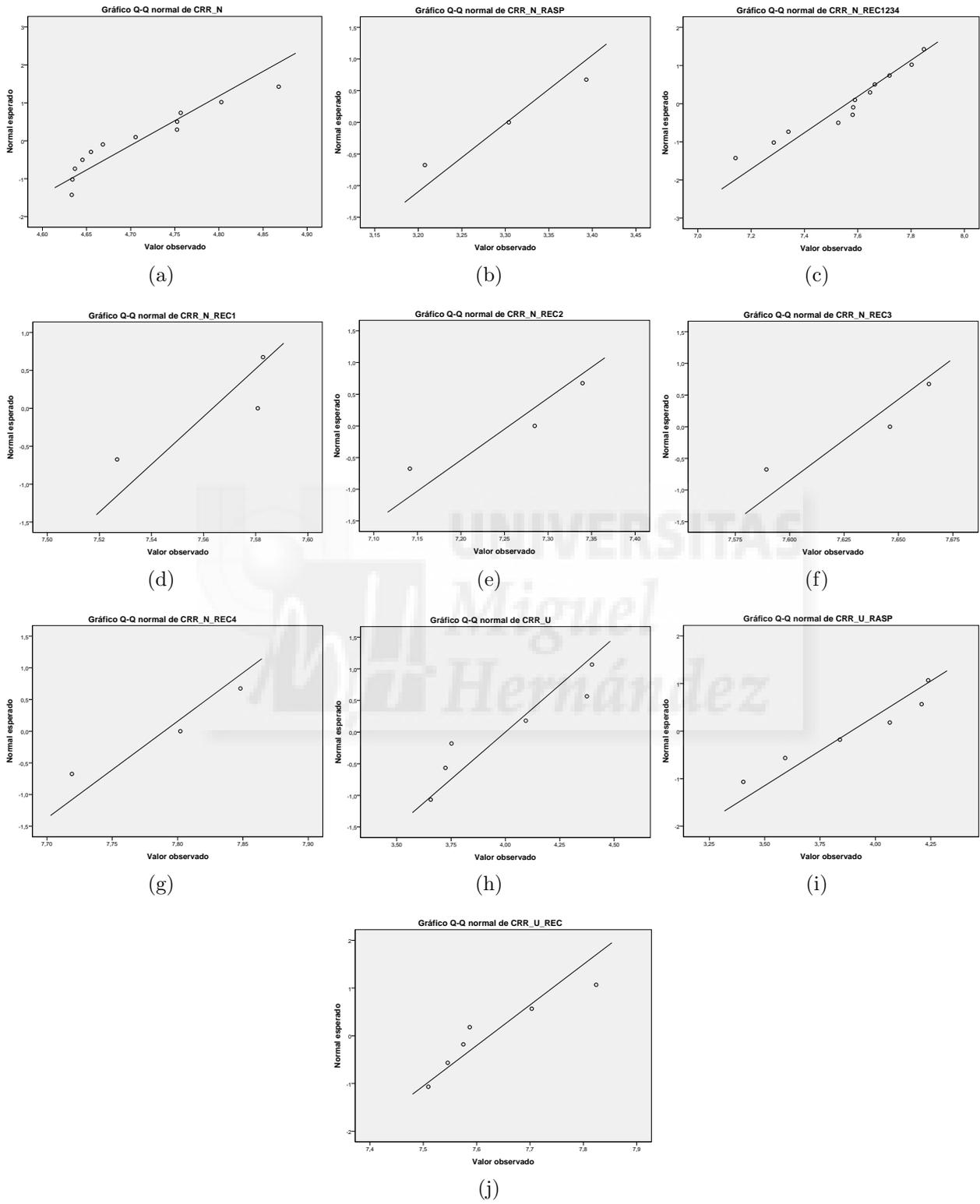


Figura 4.15: Gráficas de contraste de normalidad camión

### Análisis de covarianzas

Con un primer vistazo a los resultados se puede intuir la correlación existente entre algunas de las principales variables calculadas o medidas, como la masa y espesor de banda. Por otro lado, se ha relacionado también algunos de los principales factores de influencia encontrados en la literatura y vistos en el capítulo 2, como pueden ser entre otros, la temperatura y el diámetro exterior del neumático.

Es debido a estas dos cuestiones, que se ha decidido realizar un análisis de covarianza entre todas las variables tomadas o calculadas durante los ensayos, creando una matriz de correlación de Pearson, cuyos resultados podemos ver en las figuras C.27 y C.28 del anexo C.

El perímetro, la profundidad de banda o la profundidad de dibujo tienen una correlación similar a la observada en el diámetro exterior sin carga, por esto se ha escogido mostrar el valor de esta última variable como valor representativo del tamaño del neumático y del espesor de banda. En el caso de la inercia se mostrará la masa, que tienen buena correlación con ella. La correlación del CRR con la temperatura solo se muestra en los ensayos de turismo debido a la falta de algunos datos en los ensayos de camión, aunque muestran también correlación.

Además, se ha decidido extraer del análisis las variables que no han mostrado correlación con el CRR. En el caso de los resultados de camión, han sido el radio en carga y la profundidad de flanco, que posiblemente no tengan relación, quizás debido a encontrarse en un rango de valores muy próximos entre sí. En el caso de turismo, no se han encontrado correlaciones con el ancho de la sección y con la fecha de fabricación. Se estima la misma causa que en camión para el ancho de la sección. Para la fecha de fabricación se asume que no guarda relación.

Las variables que han mostrado mayor correlación con el CRR han resultado ser la masa, el diámetro exterior sin carga y la temperatura, cuyos resultados podemos ver en las figuras 4.20 y 4.21.

Tabla 4.20: Principales correlaciones de camión

<b>Correlación de Pearson para muestras C3</b>			
	CRR a 80 km/h (N/kN)	Masa (kg)	Diámetro sin carga (mm)
CRR a 80 km/h (N/kN)	1	0,816	0,849
Masa (kg)	0,816	1	0,972
Diámetro sin carga (mm)	0,849	0,972	1
La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)			

Tabla 4.21: Principales correlaciones de turismo

Correlación de Pearson para Muestras C1				
	CRR a 80 km/h (N/kN)	Masa (kg)	Diámetro sin carga (mm)	Temperatura banda (mm)
CRR a 80 km/h (N/kN)	1	0,985	0,915	0,932
Masa (kg)	0,985	1	0,957	0,951
Diámetro sin carga (mm)	0,915	0,957	1	0,952
Temperatura banda (mm)	0,932	0,951	0,952	1
La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)				

Del resto de variables analizadas para camión, se ha observado una menor correlación del CRR con la profundidad del dibujo de la banda, la temperatura de hombro y flanco, el ancho de la sección, la inercia, la rigidez y la fecha de fabricación. Por otro lado, en los resultados de turismo el CRR ha resultado tener una correlación moderada con la profundidad de la banda, dibujo y flanco, y una correlación baja con la rigidez.

### Posprocesados Tukey de pruebas ANOVA

A continuación, se mostrarán en las tablas 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28, los principales resultados del posprocesado HSD de Tukey extraído de una comparación previa de valores medios de tipo ANOVA.

El principal objetivo de estas pruebas, ha sido reforzar el análisis comparativo realizado. El análisis Tukey, mostrará los valores medios para las muestras, en los subconjuntos homogéneos encontrados, con un nivel confianza del 95 %. Los subconjuntos claramente diferenciados, podrán ser comparados entre ellos por encontrarse los valores medios lo suficientemente separados. Las muestras que han quedado dentro de los subconjuntos, que claramente no pertenezcan a él, podrán nos ser tenidos en cuenta. Por ejemplo: la muestra de neumáticos usados formará subconjunto en ocasiones con la muestra de neumáticos usados raspados, pero al tener la certeza de que provienen de dos poblaciones diferentes, no serán consideradas como parte de una misma población.

Tabla 4.22: Posprocesado HSD de Tukey del CRR para camión

CRR a 80 km/h (N/kN)					
HSD Tukey <sup>a,b</sup>					
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
C3_N_RASP	3	3,302			
C3_U_RASP	6		3,891		
C3_U	6		4,000		
C3_N	12			4,709	
C3_N_REC123	9				7,484
C3_N_REC1234	12				7,560
C3_U_REC	6				7,624
Significación		1,000	0,967	1,000	0,894

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,300.

b. Los tamaños de muestra no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de muestra. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 4.23: Posprocesado HSD de Tukey de la masa para camión

Masa (kg)						
HSD Tukey <sup>a,b</sup>						
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
C3_U_RASP	3	43,5				
C3_U_RASP	6	43,7				
C3_U	6		52,3			
C3_N	12			61,1		
C3_U_REC	6				63,2	
C3_N_REC1234	12					66,2
C3_N_REC123	9					66,3
Significación		0,998	1,000	1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,300.

b. Los tamaños de muestra no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de muestra. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 4.24: Posprocesado HSD de Tukey del diámetro exterior para camión

Diámetro sin carga (mm)					
HSD Tukey <sup>a,b</sup>					
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
C3_U_RASP	6	985,0			
C3_N_RASP	3	985,2			
C3_U	6		1001,9		
C3_N	12			1016,0	
C3_U_REC	6				1025,5
C3_N_REC1234	12				1027,8
C3_N_REC123	9				1028,4
Significación		1,000	1,000	1,000	0,622

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,300.

b. Los tamaños de muestra no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de muestra. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 4.25: Posprocesado HSD de Tukey del CRR para turismo

CRR a 80 km/h (N/kN)								
HSD Tukey <sup>a</sup>								
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
C1_U_RASP	4	5,116						
C1_N1_RASP	4		5,698					
C1_U	4			6,459				
C1_N2_RASP	4				6,939			
C1_N1	4					8,058		
C1_N2	4						9,644	
C1_U_REC	4						9,699	
C1_N1_REC	4						9,901	
C1_N2_REC	4							12,007
Significación		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,659	1,000

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.

Tabla 4.26: Posprocesado HSD de Tukey de la masa para turismo

Masa (kg)							
HSD Tukey <sup>a</sup>							
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
C1_U_RASP	4	4,9					
C1_N1_RASP	4	5,0					
C1_N2_RASP	4		5,9				
C1_U	4			6,2			
C1_N1	4				7,2		
C1_N2	4					8,1	
C1_U_REC	4					8,1	
C1_N1_REC	4					8,2	
C1_N2_REC	4						9,4
Significación		0,866	1,000	1,000	1,000	0,670	1,000

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.

Tabla 4.27: Posprocesado HSD de Tukey del diámetro exterior para turismo

Diámetro sin carga (mm)								
HSD Tukey <sup>a</sup>								
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
C1_N1_RASP	4	608,0						
C1_U_RASP	4	609,0						
C1_N2_RASP	4		613,0					
C1_U	4			617,4				
C1_N1	4				623,1			
C1_N1_REC	4					625,2		
C1_U_REC	4					626,1	626,1	
C1_N2_REC	4						628,1	628,1
C1_N2	4							628,2
Significación		0,720	1,000	1,000	1,000	0,886	0,057	1,000

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.  
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.



Tabla 4.28: Posprocesado HSD de Tukey de la temperatura de banda para turismo

Temperatura de banda (°C)							
HSD Tukey <sup>a,b</sup>							
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
C1_U_RASP	4	35,0					
C1_N1_RASP	4	35,2	35,2				
C1_N2_RASP	4		37,3	37,3			
C1_U	4			37,9			
C1_N1	4				42,9		
C1_U_REC	4				43,3	43,3	
C1_N1_REC	4					45,5	45,5
C1_N2	4						46,0
C1_N2_REC	4						46,5
Significación		1,000	0,075	0,996	1,000	0,061	0,843

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.  
a Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,273.  
b Los tamaños de nuestras no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de muestra Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

## 4.5. Análisis del CRR a distintas velocidades

Para los neumáticos estudiados en los apartados anteriores se han obtenido, utilizando la misma metodología, los valores medios del CRR para las velocidades de 70, 80 y 90 km/h. A continuación, en las gráficas de las figuras 4.16 y 4.17, podremos ver esta variación para todas las muestras ensayadas en los apartados anteriores, tanto para las muestras de camión como para las de turismo.

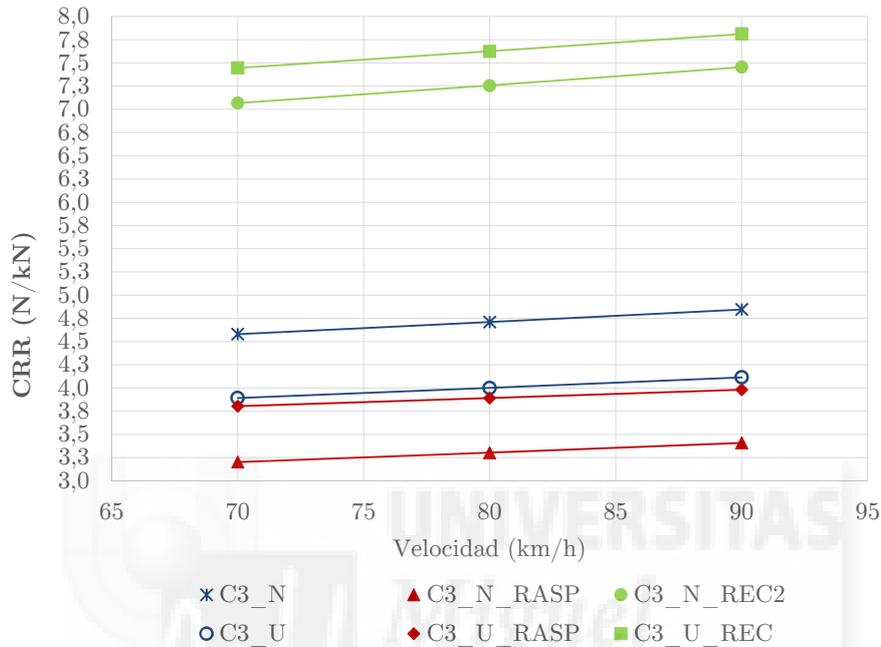


Figura 4.16: Variación del CRR de camión con la velocidad

En vista de estas gráficas, podemos decir que todas las conclusiones antes extraídas para 80 km/h se mantienen para 70 y 90 km/h. Cabe señalar, además, como hemos visto en el capítulo 2, que la velocidad es un factor de influencia del CRR, que se mantiene constante en turismo hasta aproximadamente 60 km/h y que aumenta de forma exponencial a velocidades mayores.

Si comparamos las curvas obtenidas con la curva exponencial positiva mostrada en la figura 2.26 del capítulo 2, podemos observar, que aunque en la mayoría de ellas se debe haber superado la velocidad para la cual el CRR es independiente de la velocidad, podríamos estar aún situados en el primer tramo de la curva exponencial, donde la influencia de la velocidad en el CRR todavía no es demasiado grande.

Por otro lado, esta variación se ve más acusada en las muestras recauchutadas de camión (C3.N\_REC2 y C3.U\_REC) y en la muestra recauchutada del segundo fabricante de turismo (C1.N2\_REC), lo que puede ser indicio de una mayor influencia de la velocidad en el CRR para estos casos.

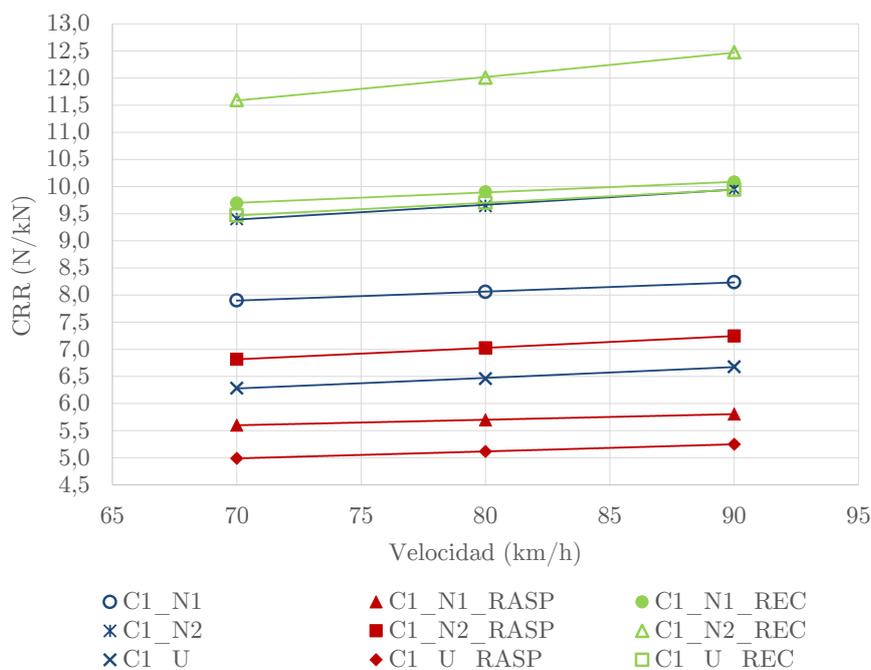


Figura 4.17: Variación del CRR de turismo con la velocidad

## 4.6. Extrapolación de los resultados obtenidos a otros tipos de neumáticos

Como hemos podido leer, en este estudio se han analizado neumáticos nuevos y recauchutados, de un solo fabricante para las muestras de camión y de dos fabricantes para las de turismo. Por otro lado, todos ellos han sido recauchutados por un solo fabricante o recauchutador.

Para valorar las posibles diferencias en los resultados obtenidos, debido a la influencia de la carcasa y del fabricante de los neumáticos recauchutado, se ha analizado una muestra de distintos recauchutadores y procesos de recauchutado, de los que se desconoce el estado de la carcasa de partida. En la tabla 4.29, podemos ver un resumen de los principales resultados para un grupo de neumáticos con las mismas dimensiones nominales.

Tabla 4.29: Resultados de otras muestras de camión ensayadas

Referencia	Designación normalizada	Fabricante	Proceso	Masa (kg)	Diámetro sin carga (mm)	CRR a 80 km/h (N/kN)
C3_O1	315/80 R22.5 154/150M	A	Frio	67,8	1085,4	7,253
C3_O2	315/80 R22.5 154/150M	A	Frio	73,7	1098,2	9,276
C3_O3	315/80 R22.5 156/150K	B	Caliente	69,0	1096,0	6,947
C3_O4	315/80 R22.5 156/150K	C	Caliente	70,1	1095,0	7,201
C3_O5	315/80 R22.5 156/150L	D	Frio	62,2	1078,2	5,515
C3_O6	315/80 R22.5 156/150L	E	Frio	68,3	1085,4	7,200

En vista a esta pequeña muestra de resultados podemos decir, que el factor de influencia de la carcasa de partida, podría verse incrementado considerablemente debido otros factores de influencia no abordados en esta tesis. Por tanto, cabe reseñar, que para evaluar la influencia

general del tipo y fabricante de la carcasa de partida, se debería realizar un estudio sobre una muestra mucho más amplia, donde se valoren más tipos de carcasas y fabricantes de neumáticos recauchutados.

Finalmente, aunque hay otros parámetros de influencia que habría que estudiar, las conclusiones obtenidas de este estudio respecto a, por ejemplo, la influencia del estado de la carcasa, se consideran válidas y, por tanto, la metodología desarrollada en esta tesis, es perfectamente útil para realizar una extrapolación de la misma a una muestra de neumáticos mayor.



---

## Capítulo 5

### Conclusiones y principales aportaciones





Se resumen, a continuación, las principales conclusiones con respecto al ensayo de resistencia a la rodadura utilizado, la metodología empleada y los resultados obtenidos de los ensayos, así como la relación con las emisiones y consumo de combustible.

## Respecto al ensayo de resistencia a la rodadura

- Se ha experimentado que el resultado del CRR es muy sensible a las condiciones de ensayo, lo que exige ser muy riguroso en el procedimiento de preparación y aclimatación de las muestras.
- Se ha encontrado que el resultado del CRR se ve muy influenciado por las condiciones y el momento en el que se hace el ensayo de pérdidas. Se han realizado pruebas específicas para analizar el resultado de distintas opciones, buscando cual es la mejor forma de las pérdidas medidas reproduzcan las condiciones existentes en el ensayo de resistencia a la rodadura.
  - En primer lugar, se concluyó que es mejor realizar el ensayo de pérdidas después del ensayo de resistencia a la rodadura. En caso contrario, sería necesario realizar un calentamiento equivalente al marcado por la norma para este ensayo, previamente al ensayo de pérdidas.
  - Una vez determinado que el ensayo de pérdidas debe realizarse tras el ensayo de resistencia a la rodadura, se estudió la conveniencia de introducir una etapa adicional de calentamiento entre ambas pruebas.
  - En el caso de neumáticos de camión, se ha observado un aumento de las pérdidas medidas si se introduce una etapa intermedia de calentamiento sin carga, mientras que la introducción de una etapa de calentamiento con carga, no tienen un efecto significativo. Por el contrario, en neumáticos de turismo, la introducción de una etapa de calentamiento con carga previa al ensayo de pérdidas, produce un incremento adicional de temperatura y una disminución de las pérdidas medidas. Finalmente, se concluye que para reproducir las condiciones de pérdidas del ensayo de resistencia a la rodadura la mejor opción es realizar el ensayo de pérdidas directamente tras el ensayo de resistencia a la rodadura, sin etapa de calentamiento intermedio.
- A la vista de lo anterior se han definido las condiciones en las que ha de realizarse el ensayo de pérdidas. Este aspecto, que es determinante para asegurar las condiciones de repetibilidad, no está definido en las principales normas de ensayo y, por tanto, la conclusión obtenida se considera una de las aportaciones novedosas de esta tesis.
- Se ha realizado un procedimiento detallado del ensayo, en el que se va un poco más allá de lo marcado en la norma, lo que se ha mostrado también útil para asegurar la repetibilidad

de los resultados.

## Respecto a la metodología empleada

- Se ha desarrollado una metodología de ensayo específicamente pensada para neumáticos recauchutados, en la que primero se ensayan neumáticos de origen, luego estos mismos neumáticos de origen se ensayan sin la banda de rodadura (raspado) y finalmente se vuelven a ensayar una vez recauchutados.
- Por un lado, se ha podido evaluar, sin la influencia del estado de la carcasa, la influencia del material aportado al recauchutado, para lo que se han comparado neumáticos nuevos en estado original con las carcassas raspadas de estos mismos neumáticos y estas a su vez, han sido comparadas con neumáticos recauchutados sobre estas carcassas de neumáticos nuevos.
- Por otro lado, para evaluar la influencia de la carcasa, se han ensayado carcassas de neumáticos usados con diferentes estados de utilización y tipo de carcassas, que posteriormente se han recauchutado con el mismo material y ensayado de nuevo.
- Esta doble vía de ensayo se ha mostrado muy útil para cuantificar de manera independiente cual es la influencia debida a la carcasa y al estado de la misma, y cuál es la debida a la banda de rodadura y/o el proceso de recauchutado.
- A pesar de que la muestra ensayada en este estudio no es lo suficientemente amplia se considera que la metodología desarrollada es válida para ser extrapolada a una población mucho más amplia, representativa de los neumáticos comercializados en la actualidad.

## Respecto a los resultados obtenidos de los ensayos

- Respecto a la comparación entre neumáticos nuevos y recauchutados sobre carcassas nuevas, utilizados para no tener en cuenta la influencia a la carcasa, se concluye que los neumáticos recauchutados siempre han dado mayores valores de CRR que los nuevos equivalentes. No obstante, hay que tener en cuenta, que actualmente en los neumáticos recauchutados de camión, es habitual introducir mayores espesores de banda, buscando una mayor durabilidad.
- Respecto al estado de la carcasa, cabe destacar que, para los neumáticos de camión las carcassas raspadas usadas tienen peor comportamiento que las nuevas raspadas. Por otro lado, en los neumáticos de turismo se ha observado un comportamiento incluso algo mejor en las carcassas usadas que en las nuevas. En cualquier caso, después de recauchutar estas diferencias se suavizan, posiblemente debido al nuevo proceso de vulcanización que se produce durante el recauchutado. La conclusión es, por tanto, que el estado de la carcassas tiene una influencia baja sobre el CRR del neumático recauchutado.

- Respecto al tipo de carcasa de partida usada, aunque solo se han comparado neumáticos de turismo de dos fabricante y tipo de carcasas diferentes, parece que este es un parámetro de mucha influencia en el CRR y que es uno de los parámetros de mayor influencia en el CRR de los neumáticos recauchutados. Sin embargo, debido a que esta valoración se ha realizado solo sobre dos tipos y fabricantes, los resultados deben tratarse con precaución. Por tanto, para evaluar la influencia general del tipo de carcasa de partida, se debería realizar un estudio sobre una muestra mucho más amplia, donde se valoren más tipos de carcasas y fabricantes.
- El mayor factor de influencia sobre el resultado del recauchutado a igualdad de carcasa, es la cantidad de material añadido en la banda. El tipo de material, a la vista de los resultados obtenidos con los tres compuestos comparados, parece tener una influencia mucho menor que la cantidad de material.
- Se ha establecido cual ha sido la contribución al CRR de la carcasa y la banda, en todos los casos:
  - Para los neumáticos nuevos, tanto en turismo como en camión, la mayor parte de la resistencia a la rodadura es atribuible a la carcasa, en torno a un 70%. Esto refleja que todavía nos queda un 30% del CRR que, puede ser achacable a la influencia de la banda de rodadura.
  - En los neumáticos nuevos recauchutados aumenta el porcentaje de influencia de la banda de rodadura, siendo de un 54% para camión y de un 42% para turismo.
  - En el caso de neumáticos usados recauchutados, estos porcentajes se han visto afectados por el estado de las carcasas de partida, lo que se ha reflejado en camión en un aumento de la influencia de las carcasas, reduciendo la influencia de la banda a un 49%. Por otro lado, en turismo, que las carcasas usadas han resultado tener una menor influencia, ha aumentado la influencia de la banda a 47%.
- De los resultados de los ensayos realizados a otras velocidades, se concluye que los resultados y conclusiones obtenidos anteriormente a una velocidad de 80 km/h, son directamente extrapolables a los obtenidos a una velocidad inferior y otra superior de 70 y 90 km/h, respectivamente.

## **Influencia del uso de recauchutado en el consumo de combustible del vehículo y emisiones CO<sub>2</sub>**

- En general se ha visto que los recauchutados tiene un CRR en torno a un 60% mayor que el de los neumáticos de partida, lo que es equivalente a un aumento del consumo de combustible del vehículo. No obstante, todos los neumáticos ensayados entran dentro de

los márgenes admisibles por la reglamentación para la venta de neumáticos nuevos en la actualidad, y por tanto, el consumo de combustible podría ser equivalente al de algunos de los neumáticos de bajas prestaciones en cuanto a CRR comercializados actualmente. Por otro lado, hay que tener en cuenta que los neumáticos recauchutados de camión pueden tener un espesor de banda de rodadura mayor, por lo que el CRR medido con un espesor de banda equivalente, podría haber sido menor.

- En cuanto a las muestras de turismo, la diferencia encontrada ha sido menor, en torno a un 25 %, y en este caso no se puede achacar a una diferencia del espesor de banda al tener diámetros equivalentes.
- No obstante, para valorar la penalización en el consumo del vehículo y las posibles variaciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> se debería analizar el ciclo de vida completo del neumático, teniendo en cuenta la fabricación del neumático recauchutado y la duración del mismo debido al mayor espesor de banda, lo que excede el ámbito de este estudio.



---

## Capítulo 6

### Futuras líneas de investigación





A continuación, describiremos brevemente cuales pueden ser las líneas de investigación que pueden preceder al trabajo realizado:

- Se propone como primera línea de investigación, un estudio similar al realizado, pero sobre neumáticos recauchutado con el mismo espesor de banda. Lo que nos puede ayudar a distinguir de una forma más clara otros factores de influencia sobre el CRR, sin tener en cuenta la influencia de la cantidad de material añadido en la banda.
- Como segunda línea de investigación se propone ampliar el estudio, aumentando los tamaños de las muestras y considerando otros parámetros como:
  - La marca o fabricante del neumático de partida.
  - El tipo de carcasa, diferentes: índices de carga, códigos de velocidad, tipos de estructura, ...
  - Otros tamaños de neumáticos.
  - Antigüedad y/o km recorridos de la carcasa de partida.
  - Diferentes radios de raspado o "buffing radius".
  - Espesor remanente de banda tras el raspado del neumático de partida.
  - Diferencia entre procesos de fabricación, recauchutado en caliente y en frío.
  - Diferentes tipos y geometrías de bandas precuradas para el proceso de fabricación por recauchutado en frío.
  - Diferentes composiciones de goma para el proceso de fabricación por recauchutado en caliente.
  - Diferentes moldes y geometría de banda para el proceso de fabricación por recauchutado en caliente.
  - Equilibrado y homogeneización del material del neumático recauchutado.
- Como tercera y última línea de investigación, se plantea desarrollar un modelo numérico, que sea validado con los resultados obtenido de ampliar el estudio en la línea de investigación anterior y que permita extrapolar los resultados de este estudio a otros neumáticos de diferentes tipos de carcasa, dimensiones, compuestos, cantidad de material añadido, etc., sin necesidad de realizar ensayos en banco. Para este fin se propone la creación de una ecuación empírica que dependa de los principales parámetros de influencia en el CRR y que nos ayude a predecir el valor del CRR de los neumáticos tras el recauchutado. En

ejemplo de esta ecuación podría ser algo similar la mostrada a continuación.

$$CRR_2 = f(CRR_1)$$

$$CRR_2(CRR_1) = \sum_{i,j,k=m}^n (X_i \cdot CRR_1^{Y_j} + Z_k)$$

Donde:

$CRR_2$ , sería el Coeficiente de Resistencia a la Rodadura del neumático una vez re-cauchutado

$CRR_1$ , sería el Coeficiente de Resistencia a la Rodadura del neumático de partida, estimado a partir del etiquetado del neumático de origen.

$X_i, Y_j, Z_k$ , serían una serie de coeficientes que dependen de los factores de influencia estudiados en la línea anterior.

$m$ , serían un numero entero desde 1 hasta  $n$ , que identifique las variables  $X, Y, Z$ , que intervienen en la ecuación.

Nota: Estos coeficientes podrían ser, además, función de otras variables implicadas como la velocidad, la presión, etc.

---

# Apéndice A

## Tablas de resultados





## A.1. Relación de neumáticos y muestras

### A.1.1. Fase 1, fase 2 y fase 3 - Nuevos y usados

Referencia original	Marca	Modelo	Designación normalizada	Fecha fabricación	Etiquetado E consumo	Referencia raspado	Referencia recauchutado
Nuevos (C3_N)							
UMH15EN003	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	---	UMH15EN039
UMH15EN004	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	---	UMH15EN037
UMH15EN005	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	---	UMH15EN036
UMH15EN006	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	---	UMH15EN033
UMH15EN007	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	UMH15EN043	UMH16EN052
UMH15EN008	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	---	UMH15EN034
UMH15EN009	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	---	UMH15EN032
UMH15EN010	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	UMH15EN041	UMH16EN050
UMH15EN011	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	---	UMH15EN040
UMH15EN012	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	---	UMH15EN038
UMH15EN013	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	---	UMH15EN035
UMH15EN014	Michelin	X Line Energy D	315/70 R 22.5 154/150L	1115	B	UMH15EN042	UMH16EN051
Usados (C3_U)							
UMH15EN026	Michelin	X Multiway 3d XDE	315/70 R 22.5 154/150L	2311	D*	UMH15EN051	UMH15EN060
UMH15EN027	Michelin	X Line Energy Z	315/70 R 22.5 156/150L	1713	B*	UMH15EN052	UMH15EN061
UMH15EN028	Michelin	X Multiway 3d XDE TL	315/70 R 22.5 154/150L	0314	D*	UMH15EN053	UMH15EN062
UMH15EN029	Michelin	X Line Energy Z	315/70 R 22.5 156/150L	1013	B*	UMH15EN054	UMH15EN063
UMH15EN030	Michelin	X Multiway 3d XZE TL	315/70 R 22.5 156/150L	2112	C*	UMH15EN055	UMH15EN064
UMH15EN031	Michelin	X Energy Savergreen XF TL	315/70 R 22.5 156/150L	4810	C*	UMH15EN056	UMH15EN065
Nuevos (C1_N1)							
UMH16EN076	Michelin	Energy Saver	185/65 R 15 88H	3811	C	UMH17EN001	UMH17EN014
UMH16EN077	Michelin	Energy Saver	185/65 R 15 88H	3811	C	UMH17EN002	UMH17EN015
UMH16EN078	Michelin	Energy Saver	185/65 R 15 88H	1912	C	UMH17EN003	UMH17EN016
UMH16EN079	Michelin	Energy Saver	185/65 R 15 88H	2312	C	UMH17EN004	UMH17EN017
Nuevos (C1_N2)							
UMH16EN080	Nexen	Class Premier CP641	185/65 R 15 88H	4111	---	UMH17EN005	UMH17EN018
UMH16EN081	Nexen	Class Premier CP641	185/65 R 15 88H	4011	---	UMH17EN006	UMH17EN019
UMH16EN082	Nexen	Class Premier CP641	185/65 R 15 88H	1912	---	UMH17EN007	UMH17EN020
UMH16EN083	Nexen	Class Premier CP641	185/65 R 15 88H	1912	---	UMH17EN008	UMH17EN021
Usados (C1_U)							
UMH16EN063	Michelin	Energy Saver	185/65 R 15 88T	1110	C	UMH17EN009	UMH17EN022
UMH16EN064	Michelin	Energy Saver	185/65 R 15 88T	1110	C	UMH17EN010	UMH17EN023
UMH16EN065	Michelin	Energy Saver	185/65 R 15 88T	1210	C	UMH17EN011	UMH17EN024
UMH16EN066	Michelin	Energy Saver	185/65 R 15 88T	1110	C	UMH17EN012	UMH17EN025
--- No dispone de referencia de ensayo o de etiquetado.							
* Calificación Energética en estado nuevo, sin usar.							

Tabla A.1: Relación de neumáticos y muestras fase 1, fase 2 y fase 3, nuevos y usados

## A.2. Mediciones

### A.2.1. Fase 1 – Neumáticos en estado de partida

Referencia de muestra	Fecha fabricación	Ancho de la sección (mm)	Perímetro sin carga (mm)	Diámetro sin carga (mm)	Radio con carga (mm)	Profundidad banda (mm)	Masa (kg)	Inercia (kg.m <sup>2</sup> )	Temperatura banda (°C)	Temperatura hombro (°C)	Temperatura talón (°C)
Nuevos (C3_N)											
UMH15EN003	1115	314,3	3197	1017,6	473,5	16,2	61,1	17,200	---	---	---
UMH15EN004	1115	314,7	3190	1015,4	474,1	15,1	61,2	17,200	---	46,9	52,7
UMH15EN005	1115	314,2	3192	1016,0	474,6	15,4	61,2	17,200	---	45,2	51,0
UMH15EN006	1115	314,3	3195	1017,0	473,2	15,9	61,1	17,200	---	45,8	51,0
UMH15EN007	1115	314,7	3192	1016,0	473,1	15,4	61,2	17,200	---	47,8	55,9
UMH15EN008	1115	315,0	3190	1015,4	474,6	15,1	61,2	17,200	---	44,8	53,1
UMH15EN009	1115	315,0	3190	1015,4	475,4	15,1	61,1	17,200	---	45,0	53,2
UMH15EN010	1115	314,8	3190	1015,4	473,4	15,1	61,1	17,200	---	44,7	52,9
UMH15EN011	1115	315,0	3190	1015,4	474,4	15,1	61,0	17,200	---	44,2	52,7
UMH15EN012	1115	314,0	3190	1015,4	473,7	15,1	61,1	17,200	---	44,9	52,0
UMH15EN013	1115	314,0	3195	1017,0	473,2	15,9	61,0	17,200	---	45,5	52,5
UMH15EN014	1115	315,0	3192	1016,0	473,7	15,4	61,1	17,200	---	44,7	51,6
Usados (C3_U)											
UMH15EN026	2311	317,2	3120	1015,4	465,1	15,1	52,0	12,030	---	54,4	53,8
UMH15EN027	1713	318,0	3150	1002,7	466,4	8,8	52,0	12,190	---	44,0	48,7
UMH15EN028	0314	316,5	3105	988,4	463,1	1,6	53,0	11,640	---	53,5	53,7
UMH15EN029	1013	318,7	3150	1002,7	467,6	9,2	52,0	11,750	---	40,2	47,2
UMH15EN030	2112	318,0	3155	1004,3	467,6	9,5	54,0	11,950	---	45,4	49,5
UMH15EN031	4810	317,2	3135	997,9	464,6	6,4	51,0	11,990	---	43,3	47,4
Nuevos (C1_N1)											
UMH16EN076	3811	189,8	1960	623,9	284,2	8,0	7,1	1,214	42,4	---	---
UMH16EN077	3811	190,5	1956	622,6	283,1	7,5	7,2	1,206	43,2	---	---
UMH16EN078	1912	189,8	1955	622,3	281,8	7,0	7,2	1,163	43,0	---	---
UMH16EN079	2312	189,7	1960	623,9	283,2	8,0	7,1	1,171	43,0	---	---
Nuevos (C1_N2)											
UMH16EN080	4111	183,0	1972	627,7	283,7	7,8	8,0	1,217	46,1	---	---
UMH16EN081	4011	183,8	1970	627,1	283,5	8,0	8,2	1,231	46,2	---	---
UMH16EN082	1912	182,5	1976	629,0	284,5	7,6	8,1	1,211	45,8	---	---
UMH16EN083	1912	183,2	1976	629,0	284,0	7,2	8,0	1,247	45,7	---	---
Usados (C1_U)											
UMH16EN063	1110	189,5	1936	616,2	279,3	4,3	6,1	1,131	35,5	---	---
UMH16EN064	1110	189,8	1940	617,5	279,1	4,1	6,3	1,095	34,9	---	---
UMH16EN065	1210	189,4	1942	617,5	279,7	4,3	6,2	1,112	---	---	---
UMH16EN066	1110	188,8	1942	618,2	281,4	4,0	6,2	1,118	---	---	---

--- Medida no disponible

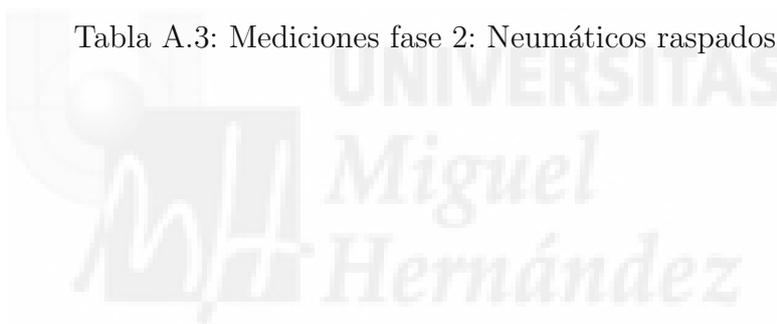
Tabla A.2: Mediciones fase 1: Neumáticos en estado de partida

## A.2.2. Fase 2 – Neumáticos raspados

Referencia origen	Referencia raspado	Fecha raspado	Ancho de la sección (mm)	Perímetro sin carga (mm)	Diámetro sin carga (mm)	Radio con carga (mm)	Profundidad banda (mm)	Masa (kg)	Inercia (kg·m <sup>2</sup> )	Temp. banda (°C)	Temp. hombro (°C)	Temp. talón (°C)
Nuevos (C3_N_RASP)												
UMH15EN010	UMH15EN041	3915	312,8	3096	985,2	458,1	---	45,8	12,503	---	43,0	50,1
UMH15EN014	UMH15EN042	3915	313,0	3096	985,2	456,4	---	45,7	12,503	---	41,5	49,2
UMH15EN007	UMH15EN043	3915	312,7	3096	985,2	458,5	---	46,1	12,503	---	40,7	46,4
Usados (C3_U_RASP)												
UMH15EN026	UMH15EN051	4415	312,7	3095	985,2	456,2	---	42,8	12,190	---	42,1	47,5
UMH15EN027	UMH15EN052	4415	312,0	3095	985,2	449,8	---	42,8	11,640	---	39,2	44,5
UMH15EN028	UMH15EN053	4415	312,0	3095	985,2	459,3	---	45,4	12,030	---	42,3	46,5
UMH15EN029	UMH15EN054	4415	312,7	3092	984,2	455,5	---	43,8	11,990	---	41,5	45,6
UMH15EN030	UMH15EN055	4415	312,0	3095	985,2	456,4	---	43,8	11,950	---	42,2	46,0
UMH15EN031	UMH15EN056	4415	312,7	3095	985,2	456,6	---	43,8	11,750	---	43,6	48,1
Nuevos (C1_N1_RASP)												
UMH16EN076	UMH17EN001	0417	189,1	1910	608,0	275,4	---	5,0	1,031	35,5	---	---
UMH16EN077	UMH17EN002	0417	190,2	1909	607,7	275,0	---	4,9	0,986	34,9	---	---
UMH16EN078	UMH17EN003	0417	189,2	1911	608,3	275,5	---	5,0	1,010	---	---	---
UMH16EN079	UMH17EN004	0417	188,6	1910	608,0	275,0	---	5,0	0,981	---	---	---
Nuevos (C1_N2_RASP)												
UMH16EN080	UMH17EN005	0417	181,5	1923	612,1	274,8	---	5,8	1,011	37,3	---	---
UMH16EN081	UMH17EN006	0417	182,6	1920	611,2	274,8	---	6,0	1,049	---	---	---
UMH16EN082	UMH17EN007	0417	181,0	1928	613,7	277,4	---	5,8	1,039	37,5	---	---
UMH16EN083	UMH17EN008	0417	181,3	1931	614,7	276,9	---	5,9	1,043	37,2	---	---
Usados (C1_U_RASP)												
UMH16EN063	UMH17EN009	0417	188,8	1909	607,7	275,8	---	4,8	0,951	36,2	---	---
UMH16EN064	UMH17EN010	0417	188,5	1914	609,2	275,8	---	5,0	0,976	---	---	---
UMH16EN065	UMH17EN011	0417	188,5	1913	608,9	275,7	---	4,8	0,954	34,8	---	---
UMH16EN066	UMH17EN012	0417	188,2	1917	610,2	275,9	---	4,9	0,978	34,0	---	---

--- Sin banda (0,0 mm) o medida no disponible

Tabla A.3: Mediciones fase 2: Neumáticos raspados



### A.2.3. Fase 3 – Neumáticos recauchutados

Referencia origen	Referencia recauchutado	Fecha fabricación	Ancho de la sección (mm)	Perímetro sin carga (mm)	Diámetro sin carga (mm)	Radio con carga (mm)	Profundidad banda (mm)	Masa (kg)	Inercia (kg·m <sup>2</sup> )	Temp. banda (°C)	Temp. hombro (°C)	Temp. talón (°C)
Nuevos (C3_N_REC1)												
UMH15EN006	UMH15EN033	3915	318,2	3230	1028,8	479,9	21,8	66,2	16,973	---	56,7	61,3
UMH15EN005	UMH15EN036	3915	317,3	3230	1028,1	478,4	21,5	66,5	16,973	---	56,5	62,3
UMH15EN012	UMH15EN038	3915	317,2	3230	1028,1	479,6	21,5	66,0	16,973	---	55,2	61,2
Nuevos (C3_N_REC2)												
UMH15EN009	UMH15EN032	3915	318,0	3230	1028,1	474,0	21,5	66,5	16,973	---	59,5	63,6
UMH15EN013	UMH15EN035	3915	318,0	3233	1029,1	481,2	22,0	66,2	16,973	---	54,3	59,6
UMH15EN003	UMH15EN039	3915	317,6	3230	1028,1	478,0	21,5	66,2	16,973	---	59,8	61,1
Nuevos (C3_N_REC3)												
UMH15EN008	UMH15EN034	3915	318,2	3230	1028,1	481,0	21,5	67,0	16,973	---	54,4	62,0
UMH15EN004	UMH15EN037	3915	318,0	3230	1028,1	478,7	21,5	65,7	16,973	---	54,6	60,7
UMH15EN011	UMH15EN040	3915	317,8	3230	1028,1	480,9	21,5	66,0	16,973	---	55,3	62,3
Nuevos (C3_N_REC4)												
UMH15EN010	UMH16EN050	2216	321,7	3224	1026,2	417,4	20,5	65,7	16,730	---	---	---
UMH15EN014	UMH16EN051	2216	321,3	3223	1025,9	416,6	20,4	66,0	16,300	---	---	---
UMH15EN007	UMH16EN052	2216	321,3	3223	1025,9	415,9	20,4	66,1	16,710	---	---	---
Usados (C3_U_REC)												
UMH15EN026	UMH15EN060	4815	318,0	3220	1025,0	479,0	19,9	62,5	17,040	---	---	---
UMH15EN027	UMH15EN061	4815	319,0	3220	1025,0	475,0	19,9	62,4	16,260	---	---	---
UMH15EN028	UMH15EN062	4815	317,3	3225	1026,5	477,5	20,7	64,5	16,330	---	---	---
UMH15EN029	UMH15EN063	4815	318,3	3225	1026,5	476,2	21,2	62,3	16,310	---	---	---
UMH15EN030	UMH15EN064	4815	319,5	3220	1025,0	476,0	19,9	63,7	13,850	---	---	---
UMH15EN031	UMH15EN065	4815	318,7	3220	1025,0	475,9	19,9	63,8	16,370	---	---	---
Nuevos (C1_N1_REC)												
UMH16EN076	UMH17EN014	0717	193,3	1966	625,8	284,6	8,9	8,3	1,274	47,2	---	---
UMH16EN077	UMH17EN015	0717	193,3	1965	625,5	284,5	8,9	8,2	1,267	46,6	---	---
UMH16EN078	UMH17EN016	0717	193,0	1963	624,8	284,9	8,3	8,2	1,267	44,8	---	---
UMH16EN079	UMH17EN017	0717	192,5	1963	624,8	286,8	8,4	8,1	1,267	43,3	---	---
Nuevos (C1_N2_REC)												
UMH16EN080	UMH17EN018	0717	183,1	1973	628,0	285,8	8,0	9,2	1,320	---	---	---
UMH16EN081	UMH17EN019	0717	184,4	1972	627,7	286,8	8,3	9,6	1,325	46,8	---	---
UMH16EN082	UMH17EN020	0717	183,5	1974	628,3	288,2	7,3	9,5	1,321	46,5	---	---
UMH16EN083	UMH17EN021	0717	185,0	1973	628,0	287,4	6,7	9,4	1,345	46,1	---	---
Usados (C1_U_REC)												
UMH16EN063	UMH17EN022	0717	192,3	1966	625,8	284,7	9,1	8,2	1,263	44,1	---	---
UMH16EN064	UMH17EN023	0717	191,9	1965	625,5	285,8	8,1	8,1	1,230	42,9	---	---
UMH16EN065	UMH17EN024	0717	192,1	1969	626,8	283,6	8,9	8,1	1,248	43,7	---	---
UMH16EN066	UMH17EN025	0717	191,9	1967	626,1	285,3	8,0	8,0	1,242	42,4	---	---

--- Medida no disponible

Tabla A.4: Mediciones fase 3: Neumáticos recauchutados

## A.3. Resultados

### A.3.1. Fase 1 – Neumáticos en estado de partida

Referencia origen	CRR a 70 km/h (N/kN)	CRR a 80 km/h (N/kN)	CRR a 90 km/h (N/kN)
Nuevos (C3_N)			
UMH15EN003	4,522	4,637	4,776
UMH15EN004	4,516	4,634	4,767
UMH15EN005	4,559	4,706	4,850
UMH15EN006	4,621	4,753	4,884
UMH15EN007	4,604	4,753	4,883
UMH15EN008	4,529	4,655	4,808
UMH15EN009	4,637	4,803	4,930
UMH15EN010	4,711	4,868	4,999
UMH15EN011	4,624	4,757	4,895
UMH15EN012	4,533	4,633	4,769
UMH15EN013	4,555	4,645	4,794
UMH15EN014	4,544	4,669	4,786
Usados (C3_U)			
UMH15EN026	4,267	4,398	4,554
UMH15EN027	3,560	3,656	3,732
UMH15EN028	3,940	4,094	4,258
UMH15EN029	3,620	3,724	3,829
UMH15EN030	4,296	4,375	4,465
UMH15EN031	3,667	3,752	3,847
Nuevos (C1_N1)			
UMH15EN076	7,998	8,195	8,407
UMH15EN077	7,873	8,075	8,287
UMH15EN078	7,955	8,072	8,231
UMH15EN079	7,777	7,891	8,021
Nuevos (C1_N2)			
UMH15EN080	9,559	9,903	10,241
UMH15EN081	9,202	9,492	9,751
UMH15EN082	9,634	9,621	9,943
UMH15EN083	9,215	9,559	9,887
Usados (C1_U)			
UMH15EN063	5,537	5,632	5,743
UMH15EN064	5,484	5,567	5,691
UMH15EN065	5,683	5,780	5,862
UMH15EN066	5,704	5,811	5,931

Tabla A.5: Resultados fase 1: Neumáticos en estado de partida

### A.3.2. Fase 2 – Neumáticos raspados

Referencia origen	Referencia raspado	CRR a 70 km/h (N/kN)	CRR a 80 km/h (N/kN)	CRR a 90 km/h (N/kN)
Nuevos (C3_N_RASP)				
UMH15EN010	UMH15EN041	3,201	3,304	3,411
UMH15EN014	UMH15EN042	3,291	3,393	3,507
UMH15EN007	UMH15EN043	3,116	3,208	3,310
Usados (C3_U_RASP)				
UMH15EN026	UMH15EN051	3,492	3,592	3,710
UMH15EN027	UMH15EN052	3,762	3,840	3,935
UMH15EN028	UMH15EN053	3,315	3,404	3,496
UMH15EN029	UMH15EN054	4,147	4,238	4,290
UMH15EN030	UMH15EN055	4,139	4,209	4,305
UMH15EN031	UMH15EN056	3,966	4,065	4,150
Nuevos (C1_N1_RASP)				
UMH16EN076	UMH17EN001	5,537	5,632	5,743
UMH16EN077	UMH17EN002	5,484	5,567	5,691
UMH16EN078	UMH17EN003	5,683	5,780	5,862
UMH16EN079	UMH17EN004	5,704	5,811	5,931
Nuevos (C1_N2_RASP)				
UMH16EN080	UMH17EN005	6,885	7,097	7,345
UMH16EN081	UMH17EN006	6,670	6,866	7,052
UMH16EN082	UMH17EN007	6,847	7,063	7,278
UMH16EN083	UMH17EN008	6,862	7,077	7,306
Usados (C1_U_RASP)				
UMH16EN063	UMH17EN009	5,057	5,171	5,287
UMH16EN064	UMH17EN010	5,077	5,221	5,363
UMH16EN065	UMH17EN011	4,797	4,913	5,041
UMH16EN066	UMH17EN012	5,029	5,160	5,307

Tabla A.6: Resultados fase 2: Neumáticos raspados

### A.3.3. Fase 3 – Neumáticos recauchutados

Referencia origen	Referencia recauchutado	CRR a 70 km/h (N/kN)	CRR a 80 km/h (N/kN)	CRR a 90 km/h (N/kN)
Nuevos (C3_N_REC1)				
UMH15EN006	UMH15EN033	7,421	7,581	7,761
UMH15EN005	UMH15EN036	7,398	7,583	7,778
UMH15EN012	UMH15EN038	7,367	7,527	7,746
Nuevos (C3_N_REC2)				
UMH15EN009	UMH15EN032	7,102	7,285	7,493
UMH15EN013	UMH15EN035	6,947	7,141	7,329
UMH15EN003	UMH15EN039	7,159	7,340	7,547
Nuevos (C3_N_REC3)				
UMH15EN008	UMH15EN034	7,447	7,646	7,842
UMH15EN004	UMH15EN037	7,439	7,589	7,761
UMH15EN011	UMH15EN040	7,486	7,664	7,917
Nuevos (C3_N_REC4)				
UMH15EN010	UMH16EN050	7,665	7,848	8,027
UMH15EN014	UMH16EN051	7,623	7,719	7,985
UMH15EN007	UMH16EN052	7,592	7,802	7,977
Usados (C3_U_REC)				
UMH15EN026	UMH15EN060	7,746	7,824	7,989
UMH15EN027	UMH15EN061	7,327	7,509	7,721
UMH15EN028	UMH15EN062	7,317	7,546	7,717
UMH15EN029	UMH15EN063	7,397	7,575	7,787
UMH15EN030	UMH15EN064	7,409	7,587	7,775
UMH15EN031	UMH15EN065	7,487	7,703	7,891
Nuevos (C1_N1_REC)				
UMH16EN076	UMH17EN014	9,757	9,899	10,071
UMH16EN077	UMH17EN015	9,846	10,108	10,360
UMH16EN078	UMH17EN016	9,744	9,946	10,099
UMH16EN079	UMH17EN017	9,437	9,653	9,803
Nuevos (C1_N2_REC)				
UMH16EN080	UMH17EN018	11,333	11,862	12,259
UMH16EN081	UMH17EN019	11,566	11,921	12,347
UMH16EN082	UMH17EN020	11,653	11,897	12,401
UMH16EN083	UMH17EN021	11,820	12,348	12,895
Usados (C1_U_REC)				
UMH16EN063	UMH17EN022	9,840	10,069	10,338
UMH16EN064	UMH17EN023	9,204	9,434	9,698
UMH16EN065	UMH17EN024	9,630	9,902	10,173
UMH16EN066	UMH17EN025	9,200	9,391	9,559

Tabla A.7: Resultados fase 3: Neumáticos recauchutados

## A.4. Imágenes de las muestras

### A.4.1. Fase 1 – Neumáticos en estado de partida

A continuación, se mostrarán las imágenes de uno o varios neumáticos en su estado de partida y de cada muestra ensayada en la fase 1.



Figura A.1: Imágenes muestras C3\_N



Figura A.2: Imágenes muestras C3\_U



(a) Banda

(b) Flanco

De izquierda a derecha: UMH16EN076, 077, 078 y 079

Figura A.3: Imágenes muestras C1\_N1



(a) Banda

(b) Flanco

De izquierda a derecha: UMH16EN080, 081, 082 y 083

Figura A.4: Imágenes muestras C1\_N2



(a) Banda

(b) Flanco

De izquierda a derecha: UMH16EN060, 061, 062 y 063

Figura A.5: Imágenes muestras C1\_U

#### A.4.2. Fase 2 – Neumáticos raspados

A continuación, se mostrarán las imágenes de uno o varios neumáticos en su estado raspado y de cada muestra ensayada en la fase 2.



UMH15EN041-043 y UMH15EN051-056

Figura A.6: Imágenes muestras C3\_N\_RASP y C3\_U\_RASP



(a) Banda

(b) Flanco

De izquierda a derecha: UMH17EN001, 002, 003 y 004

Figura A.7: Imágenes muestras C1.N1.RASP



(a) Banda

(b) Flanco

De izquierda a derecha: UMH17EN005, 006, 007 y 008

Figura A.8: Imágenes muestras C1.N2.RASP



(a) Banda

(b) Flanco

De izquierda a derecha: UMH17EN009, 010, 011 y 012

Figura A.9: Imágenes muestras C1.U.RASP

### A.4.3. Fase 3 – Neumáticos recauchutados

A continuación, se mostrarán las imágenes de uno o varios neumáticos en su estado recauchutado y de cada muestra ensayada en la fase 3.



(a) Banda1

(b) Flanco

UMH15EN032-040 y UMH15EN060-065

Figura A.10: Imágenes muestras C3\_N\_REC1, C3\_N\_REC2, C3\_N\_REC3 y C3\_U\_REC



(a) Banda1

(b) Flanco

UMH16EN050-052

Figura A.11: Imágenes muestras C3\_N\_REC4



(a) Banda

(b) Flanco

De izquierda a derecha: UMH17EN014, 015, 016 y 017.

Figura A.12: Imágenes muestras C1\_N1\_REC



(a) Banda

(b) Flanco

De izquierda a derecha: UMH17EN018, 019, 020 y 021.

Figura A.13: Imágenes muestras C1\_N2\_REC



(a) Banda

(b) Flanco

De izquierda a derecha: UMH17EN022, 023, 024 y 025.

Figura A.14: Imágenes muestras C1\_U\_REC



---

## Apéndice B

### Análisis de la incertidumbre de la medida





## B.1. Cálculo de la incertidumbre debida a los equipos de medida

### B.1.1. Introducción

La determinación de la incertidumbre medida para ensayos de resistencia a la rodadura en banco de ensayo es una tarea compleja en la que intervienen multitud de factores. Determinar dicha incertidumbre con exactitud es, cuanto menos, un trabajo casi tan complicado como la propia realización de los ensayos o el posprocesado y evaluación de los resultados obtenidos.

Hay una probabilidad dada de que un valor de CRR, determinado según los métodos de la norma ISO 28580:2009(E)[40], tenga una desviación, comprendida dentro del intervalo de incertidumbre de medición, con respecto al valor verdadero. Esta incertidumbre en la determinación del CRR viene dada por diversos factores, algunos debidos al entorno en el laboratorio de medición y otros a las técnicas experimentales, en este apartado solo tendremos en cuenta la incertidumbre derivada de los equipos y procedimientos de medida utilizados.

Vamos a realizar el cálculo de la incertidumbre expandida, a partir de las incertidumbres típicas de los equipos usados del laboratorio de ensayo de neumáticos de la UMH. Para ello tendremos en cuenta todas las medidas indirectas necesarias para el cálculo de la resistencia a la rodadura. Para poder determinar dicha incertidumbre, utilizaremos la ecuación extraída de la norma ISO 28580:2009(E)[40] para calcular dicha incertidumbre expandida mediante la "Ley de Propagación de Incertidumbres".

Nuestro instrumento de medida, el banco de ensayos de neumáticos, aporta mediciones directas  $X \pm k \cdot I$ ; donde  $I$  es la incertidumbre calculada habitualmente con un factor de cobertura de  $k = 2$ , por lo que tenemos  $X \pm k \cdot u$ , donde  $u$  es la incertidumbre típica.

Nuestra medida indirecta la llamaremos  $Y$ , y su incertidumbre  $I_c$ ; por lo expuesto en el párrafo anterior podemos decir  $I_c = 2u_c$ ,

Habitualmente podemos expresar  $Y = f(X_i)$ , donde  $X_i$  es el resultado de la medida directa con nuestros instrumentos de medida. Conocida esa relación funcional podemos calcular la incertidumbre de  $Y$  calculando primero  $u_c$  mediante la ecuación:

$$u_c^2(Y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (\text{B.1})$$

La norma describe el procedimiento y la formulación necesaria para la obtención del CRR. A continuación, expondré la ecuación para el método por deceleración usada, sus variables

y sus unidades correspondientes, así como los factores de corrección aplicados:

$$CRR = \frac{K_{fc}}{L_m} \cdot \left[ \frac{I_D}{R} \cdot j_V + \frac{R \cdot I_T}{R_r^2} \cdot j_V - \frac{I_D}{R} \cdot j_{V0} - \frac{R \cdot I_T}{R_{r0}^2} \cdot j_{V0} \right] \quad (B.2)$$

Cuyos términos se descomponen en:

$$I_T = \frac{P_e \cdot r_{P_e}}{\alpha_1 + \alpha_2}; \quad \alpha_1 = \frac{2 \cdot X_f}{r_{P_e} \cdot t_1^2}; \quad \alpha_2 = \alpha_1 \cdot \frac{t_1}{t_2}$$

$$I_T = \frac{P_e \cdot r_{P_e}}{\frac{2 \cdot X_f}{r_{P_e} \cdot t_1^2} + \frac{2 \cdot X_f}{r_{P_e} \cdot t_1^2} \cdot \frac{t_1}{t_2}} = \frac{P_e \cdot r_{P_e} \cdot t_1^2 \cdot t_2}{2 \cdot X_f \cdot t_1 + 2 \cdot X_f \cdot t_2}$$

$$K_{fc} = K_{r25} \cdot K_d; \quad K_{r25} = 1 + K \cdot (t_{amb} - 25); \quad K_d = \sqrt{\frac{1 + r_T/2}{1 + r_T/R}}$$

Donde:

CRR, es el coeficiente de resistencia a la rodadura, en N/kN.

$L_m$ , es la carga de ensayo, kN.

$K_{fc}$ , es el coeficiente de corrección, su.

$K_{r25}$ , es el coeficiente de corrección de temperatura, su.

$K$ , es la constante de temperatura, en  $1/^\circ\text{C}$ :

0,008 para neumáticos de clase C1

0,010 para neumáticos de clase C2

0,006 para neumáticos de clase C3

$t_{amb}$ , es la temperatura media del ambiente de ensayo, en  $^\circ\text{C}$ .

$K_d$ , es el coeficiente de corrección de diámetro del tambor de ensayo, su.

$I_P$ , es la inercia de la polea de salida, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

$K_d$ , es el coeficiente de corrección por diámetro del tambor de ensayo, s.u.

$r_T$ , es el radio de diseño del neumático, en m.

$R$ , es el radio del tambor de ensayos, en m.

$R_r$ , es el radio de rodadura del neumático bajo carga, en m.

$R_{r0}$ , es el radio de rodadura del neumático sin carga, en m.

$I_D$ , es la inercia reducida del tambor de ensayo, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

$I_T$ , es la inercia del eje, neumático y rueda, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

$P_e$ , es el peso del ensayo de inercia, en N.

$R_{P_e}$ , es el radio de aplicación de peso de inercia, en m.

$X_f$ , es la distancia recorrida por el peso del ensayo de inercia, en m.

$t_1$ , es el tiempo de caída libre del peso de ensayo de inercia, en s.

$t_2$ , es el tiempo hasta parada del neumático ensayo inercia, en s.

$j_V$ , es la deceleración angular del tambor en ensayo con carga, en  $\text{rad s}^2$ .

$j_{V0}$ , es la deceleración angular del tambor en ensayo sin carga, en  $\text{rad s}^2$ .

$\omega_V$ , es la velocidad angular del tambor en ensayo con carga, en  $\text{rad s}$ .

$\omega_{V0}$ , es la velocidad angular del tambor en ensayo sin carga, en  $\text{rad s}$ .

$dt$ , es el intervalo de tiempo del ensayo con carga, en s.

$dt_0$ , es el intervalo de tiempo del ensayo sin carga, en s.

Para tener una mejor visión del proceso de cálculo se van a agrupar 4 términos, quedando la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$CRR = \frac{K_{fc}}{L_m} \cdot [L_D + L_T - L_{D0} - L_{T0}] \quad (\text{B.3})$$

Donde:

$L_D$ , es el termino de fuerza del tambor en ensayo con carga, en N.

$L_T$ , es el termino de fuerza del neumático en ensayo con carga, en N.

$L_{D0}$ , es el termino de fuerza del tambor en ensayo sin carga, en N.

$L_{T0}$ , es el termino de fuerza del neumático en ensayo sin carga, en N.

Dicho esto, a continuación, se expondrá los efectos acumulativos de la incertidumbre de las mediciones que se obtienen al aplicar la norma ISO 28580:2009(E)[40], según las variables y formulación antes expuesta, así como la relación de dependencia, unidades y referencias de incertidumbre de la tabla B.1.

Tabla B.1: Tabla de dependencias, unidades y referencias de incertidumbres

Variable	Función-Dependencia	Unidades $\pm$ ref. incertidumbre	Equipo	Ref. equipo	Incertidumbre
CRR	$f(K_{fc}, L_m, L_D, L_T, L_{D0}, L_{T0})$	$N/kN \pm I_{CRR}$	Ecuación	1	Calculada
$L_D$	$f(I_D, R, j_V)$	$N \pm I_{L_D}$	Ecuación	2	Calculada
$L_T$	$f(I_T, R, r_L, j_V)$	$N \pm I_{L_T}$	Ecuación	3	Calculada
$L_{D0}$	$f(I_D, R, j_{V0})$	$N \pm I_{L_{D0}}$	Ecuación	4	Calculada
$L_{T0}$	$f(I_T, R, R_r, j_{V0})$	$N \pm I_{L_D}$	Ecuación	5	Calculada
$K_{fc}$	$f(K_{r25}, K_d)$	$s. u. \pm I_{K_{fc}}$	Ecuación	6	Calculada
$K_{r25}$	$f(K, t_{amb})$	$s. u. \pm I_{K_{r25}}$	Ecuación	7	Calculada
$K_d$	$f(R, r_t)$	$N/kN \pm I_{CRR}$	Ecuación	8	Calculada
$R$	$f(R)$	$m \pm I_R$	Ecuación	9	$I_R \pm 0,22 \text{ mm}$
$R_r$	$f(L_1, L_2, L_3)$	$m \pm I_{R_r}$	Ecuación	10	$I_{R_r} \pm 0,15 \text{ mm}$
$R_{r0}$	$f(P_{R_{r0}})$	$m \pm I_{R_{r0}}$	Ecuación	11	$I_{R_{r0}} \pm 0,15 \text{ mm}$
$I_T$	$f(P_e, r_e, X_f, t_1, t_2)$	$kg \cdot m^2 \pm I_{I_T}$	Ecuación	12	Calculada
$j_V$	$f(d\omega_V, d_t)$	$1/s^2 \pm I_{j_V}$	Ecuación	13	$I_{j_V} \pm 0,63\%$
$j_{V0}$	$f(d\omega_{V0}, d_{t0})$	$1/s^2 \pm I_{j_{V0}}$	Ecuación	14	$I_{j_{V0}} \pm 0,63\%$
$L_m$	$f(L_m)$	$kN \pm I_{L_m}$	Puesto ensayo 2	EL-032	$I_{L_m} \pm 1,4\%$
$K$	$f(K)$	$cte (1/^\circ C)$	Cte. según	1	Sin
$t_{amb}$	$f(t_{amb})$	$^\circ C \pm I_{t_{amb}}$	Sensor T <sup>a</sup>	EL-033	$I_{t_{amb}} \pm 0,86 \text{ }^\circ C$
$r_T$	$f(r_t)$	$cte (m)$	Cte. según	2	Sin
$P_R$	$f(P_R)$	$m \pm I_{P_R}$	Cinta métrica	EL-047	$I_{P_R} \pm 1,37 \text{ mm}$
$L_1$	$f(L_1)$	$m \pm I_{L_1}$	Calibre grande	EL-035	$I_{L_1} \pm 0,05 \text{ mm}$
$L_2$	$f(L_2)$	$m \pm I_{L_2}$	Calibre pequeño	EL-065	$I_{L_2} \pm 0,05 \text{ mm}$
$L_3$	$f(L_3)$	$m \pm I_{L_3}$	Calibre pequeño	EL-065	$I_{L_3} \pm 0,05 \text{ mm}$
$P_{R_r}$	$f(P_{R_{r0}})$	$m \pm I_{P_{R_r}}$	Cinta métrica	EL-047	$I_{P_{R_r}} \pm 0,94 \text{ mm}$
$I_D$	$f(I_D)$	$kg \cdot m^2 \pm I_{I_D}$	Mismo orden R <sup>2</sup>	15	Calculada
$P_e$	$f(P_e)$	$N \pm I_{P_e}$	Dinamómetro	EL-015	$I_{P_e} \pm 1,4\%$
$r_e$	$f(r_e)$	$m \pm I_{r_e}$	Calibre pequeño	EL-065	$I_{r_e} \pm 0,05 \text{ mm}$
$X_f$	$f(X_f)$	$m \pm I_{X_f}$	Metro clase II	EL-059	$I_{X_f} \pm 0,44 \text{ mm}$
$t_1$	$f(t_1)$	$s \pm I_{t_1}$	Cronómetro	EL-020	$I_{t_1} \pm 0,01 \text{ s}$
$t_2$	$f(t_2)$	$s \pm I_{t_2}$	Cronómetro	EL-020	$I_{t_2} \pm 0,01 \text{ s}$
$d\omega_V$	$f(d\omega_V)$	$1/s \pm I_{d\omega_V}$	Tacómetro	EL-050	$I_{d\omega_V} \pm 0,63\%$
$d\omega_{V0}$	$f(d\omega_{V0})$	$1/s \pm I_{d\omega_{V0}}$	Tacómetro	EL-050	$I_{d\omega_{V0}} \pm 0,63\%$
$d_t$	$f(d_t)$	$s \pm I_{d_t}$	Reloj PC	PC	$I_{d_t} \pm 0,01 \text{ s}$
$d_{t0}$	$f(d_{t0})$	$s \pm I_{d_{t0}}$	Reloj PC	PC	$I_{d_t} \pm 0,01 \text{ s}$

### B.1.2. Cálculo de $u_c^2(X_f)$

La incertidumbre de una variable medida con un metro de clase II viene determinada por la siguiente expresión:

$$I_{X_f} = 0,3 + 0,2 \cdot X_f \text{ (en metros); resultado en mm}$$

La distancia recorrida por el peso en el ensayo de inercia ha sido medida con una cinta métrica de clase II y su incertidumbre en base a la media del perímetro obtenido ha sido la siguiente:

$$\text{Turismo } (X_f = 900 \text{ mm}): I_{X_f} = 0,48 \text{ mm}$$

$$\text{Camión } (X_f = 700 \text{ mm}): I_{X_f} = 0,44 \text{ mm}$$

La incertidumbre expandida de los equipos, según los certificados aportados por los fabricantes de los mismos, son los descritos en la introducción. A continuación, para el factor de cobertura elegido, la incertidumbre típica será  $u_c = I/2$ . Y por tanto su incertidumbre propagada deberá calcularse mediante la expresión antes mencionada, quedando en particular para esta última expresión y elevada al cuadrado de la siguiente manera:

$$\text{Turismo: } u_c^2(X_f) = 0,06$$

$$\text{Camión: } u_c^2(X_f) = 0,05$$

### B.1.3. Cálculo de $u_c^2(R)$

La variable calculada viene definida por la siguiente expresión:

$$R = \frac{P_R}{2 \cdot \pi}$$

El perímetro del tambor ha sido medido por procedimiento interno del laboratorio de ensayos con una cinta métrica de clase II y su incertidumbre en base a la media del perímetro obtenido ha sido la siguiente:

$$I_{P_R} = 0,3 + 0,2 \cdot \overline{P_R} \text{ (en metros); resultado en mm}$$

$$I_{P_R} (\overline{P_R} = 5342,81 \text{ mm}) = 1,37 \text{ mm}$$

Para el cálculo de esta variable se han realizado 25 mediciones y obtenido el valor medio del mismo, por tanto, se deberá calcular la incertidumbre para cada repetición y para el valor

medio de incertidumbre usaremos la siguiente expresión:

$$\overline{I_{P_R}} = \frac{I_{P_R}}{\sqrt{25}} = 0,27 \text{ mm}$$

La incertidumbre propagada en particular para esta última expresión queda de la siguiente manera:

$$u_c^2(R) = \left[ \frac{\partial R}{\partial P_R} \right]^2 \cdot u_c^2(P_R)$$

$$u_c^2(R) = \left[ \frac{1}{2 \cdot \pi} \right]^2 \cdot 0,02$$

Evaluando la expresión anterior tenemos que:

$$u_c^2(R) = 4,74 \cdot E^{-4}$$

#### B.1.4. Cálculo de $u_c^2(R_{r0})$

En este caso la variable viene definida por la siguiente expresión:

$$R_{r0} = \frac{P_{R_{r0}}}{2 \cdot \pi}$$

El perímetro del neumático ha sido medido con una cinta métrica de clase II y su incertidumbre en base a la media del perímetro obtenido ha sido la siguiente:

$$I_{P_{R_{r0}}} = 0,3 + 0,2 \cdot P_{R_{r0}} \text{ (en metros); resultado en mm}$$

$$\text{Turismo } (P_{R_{r0}} = 1975 \text{ mm}): I_{P_{R_{r0}}} = 0,70 \text{ mm}$$

$$\text{Camión } (P_{R_{r0}} = 3235 \text{ mm}): I_{P_{R_{r0}}} = 0,95 \text{ mm}$$

La incertidumbre propagada para esta última expresión queda de la siguiente manera:

$$u_c^2(R_{r0}) = \left[ \frac{\partial R_{r0}}{\partial P_{R_{r0}}} \right]^2 \cdot u_c^2(P_{R_{r0}})$$

$$\text{Turismo: } u_c^2(R_{r0}) = \left[ \frac{1}{2 \cdot \pi} \right]^2 \cdot 0,12$$

$$\text{Camión: } u_c^2(R_{r0}) = \left[ \frac{1}{2 \cdot \pi} \right]^2 \cdot 0,22$$

Evaluando la expresión anterior tenemos que:

$$\text{Turismo: } u_c^2(R_{r0}) = 3,06 \cdot E^{-3}$$

$$\text{Camión: } u_c^2(R_{r0}) = 5,68 \cdot E^{-3}$$

**B.1.5. Cálculo de  $u_c^2(R_r)$** 

Esta variable viene definida por la siguiente expresión:

$$R_r = L_1 + L_2 + L_3$$

El radio bajo carga dinámico ha sido medido indirectamente mediante la suma de tres distancias, dos fijas que pertenecen a medidas de las tomadas en la máquina y una tercera que es variable para cada muestra. Las distancias fijas han sido medidas con un pie de rey pequeño y la distancia variable con el pie de rey grande.

Ambos equipos tienen la misma incertidumbre asociada y, por tanto, la incertidumbre propagada queda de la siguiente manera:

$$u_c^2(R_r) = \left[ \frac{\partial R_r}{\partial L_1} \right]^2 \cdot u_c^2(L_1) + \left[ \frac{\partial R_r}{\partial L_2} \right]^2 \cdot u_c^2(L_2) + \left[ \frac{\partial R_r}{\partial L_3} \right]^2 \cdot u_c^2(L_3)$$

$$u_c^2(R_r) = [1]^2 \cdot 6,25 \cdot E^{-4} + [1]^2 \cdot 6,25 \cdot E^{-4} + [1]^2 \cdot 6,25 \cdot E^{-4}$$

Evalutando la expresión anterior tenemos que:

$$u_c^2(R_r) = 1,88 \cdot E^{-3}$$

**B.1.6. Cálculo de  $u_c^2(K_{r25})$** 

El factor de corrección del CRR por temperatura calculado, viene definida por la expresión:

$$K_{r25} = 1 + K \cdot (t_{amb} - 25)$$

Con esta variable, la incertidumbre propagada queda de la siguiente manera:

$$u_c^2(K_{r25}) = \left[ \frac{\partial K_{r25}}{\partial t_{amb}} \right]^2 \cdot u_c^2(t_{amb})$$

$$\text{Turismo: } u_c^2(K_{r25}) = [0,008]^2 \cdot 0,18$$

$$\text{Camión: } u_c^2(K_{r25}) = [0,006]^2 \cdot 0,18$$

Evalutando la expresión anterior tenemos que:

$$\text{Turismo: } u_c^2(K_{r25}) = 1,18 \cdot E^{-5}$$

$$\text{Camión: } u_c^2(K_{r25}) = 6,66 \cdot E^{-6}$$

### B.1.7. Cálculo de $u_c^2(K_d)$

El factor de corrección del CRR por diámetro del tambor de ensayo calculado, viene definida por la expresión:

$$K_d = \sqrt{\frac{1 + r_T/2}{1 + r_T/R}}$$

En este caso, tomando los radios de diseño de los neumáticos de camión y de turismo como dos constantes, la incertidumbre propagada queda de la siguiente manera:

$$u_c^2(K_d) = \left[ \frac{\partial K_d}{\partial R} \right]^2 \cdot u_c^2(R)$$

$$u_c^2(K_d) = \left[ \frac{r_T}{2 \cdot R^2} \cdot \left(1 + \frac{r_T}{2}\right)^{1/2} \cdot \left(1 + \frac{r_T}{R}\right)^{-3/2} \right]^2 \cdot 4,74 \cdot E^{-4}$$

Evaluando la expresión anterior tenemos que:

$$\text{Turismo } (r_T = 0,311 \text{ mm}) : u_c^2(K_d) = 9,97 \cdot E^{-6}$$

$$\text{Camión: } (r_T = 0,507 \text{ mm}) : u_c^2(K_d) = 1,80 \cdot E^{-5}$$

### B.1.8. Cálculo de $u_c^2(K_{fc})$

El factor de corrección del CRR conjugado de los dos anteriores viene definida por la expresión:

$$K_{fc} = K_{r25} \cdot K_d$$

Las incertidumbres de estas dos variables han sido calculadas con anterioridad así que esta incertidumbre propagada deberá calcularse mediante la expresión antes mencionada, quedando en particular para esta última expresión de la siguiente manera:

$$u_c^2(K_{fc}) = \left[ \frac{\partial K_{fc}}{\partial K_{r25}} \right]^2 \cdot u_c^2(K_{r25}) + \left[ \frac{\partial K_{fc}}{\partial K_d} \right]^2 \cdot u_c^2(K_d)$$

$$\text{Turismo: } u_c^2(K_{fc}) = [K_{r25}]^2 \cdot 1,18 \cdot E^{-5} + [K_d]^2 \cdot 9,97 \cdot E^{-6}$$

$$\text{Camión: } u_c^2(K_{fc}) = [K_{r25}]^2 \cdot 6,66 \cdot E^{-6} + [K_d]^2 \cdot 1,80 \cdot E^{-5}$$

Evaluando la expresión anterior tenemos que:

$$\text{Turismo } (K_{r25} = 1 \text{ y } K_d = 0,92) : u_c^2(K_{fc}) = 2,03 \cdot E^{-5}$$

$$\text{Camión } (K_{r25} = 1 \text{ y } K_d = 0,89) : u_c^2(K_{fc}) = 2,08 \cdot E^{-5}$$

**B.1.9. Cálculo de  $u_c^2(I_T)$** 

La inercia de los neumáticos calculada, viene definida por la expresión:

$$I_T = \frac{P_e \cdot r_e^2 \cdot t_1^2 \cdot t_2}{2 \cdot X_f \cdot t_1 + 2 \cdot X_f \cdot t_2}$$

La incertidumbre propagada para esta última expresión queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} u_c^2(I_T) &= \left[ \frac{\partial I_T}{\partial P_e} \right]^2 \cdot u_c^2(P_e) + \left[ \frac{\partial I_T}{\partial r_e} \right]^2 \cdot u_c^2(r_e) + \left[ \frac{\partial I_T}{\partial t_1} \right]^2 \cdot u_c^2(t_1) + \left[ \frac{\partial I_T}{\partial t_2} \right]^2 \cdot u_c^2(t_2) + \left[ \frac{\partial I_T}{\partial X_f} \right]^2 \cdot u_c^2(X_f) \\ \left[ \frac{\partial I_T}{\partial P_e} \right]^2 &= \left[ \frac{r_e^2 \cdot t_1^2 \cdot t_2}{2 \cdot X_f \cdot (t_1 + t_2)} \right]^2 \\ \left[ \frac{\partial I_T}{\partial r_e} \right]^2 &= \left[ \frac{P_e \cdot t_1^2 \cdot t_2}{X_f \cdot (t_1 + t_2)} \right]^2 \\ \left[ \frac{\partial I_T}{\partial t_1} \right]^2 &= \left[ \frac{4 \cdot P_e \cdot r_e^2 \cdot t_1 \cdot t_2 \cdot X_f \cdot (t_1 + t_2) - 2 \cdot X_f \cdot P_e \cdot r_e^2 \cdot t_1^2 \cdot t_2}{[2 \cdot X_f \cdot (t_1 + t_2)]^2} \right]^2 \\ \left[ \frac{\partial I_T}{\partial t_2} \right]^2 &= \left[ \frac{2 \cdot P_e \cdot r_e^2 \cdot t_1^2 \cdot X_f \cdot (t_1 + t_2) - 2 \cdot X_f \cdot P_e \cdot r_e^2 \cdot t_1^2 \cdot t_2}{[2 \cdot X_f \cdot (t_1 + t_2)]^2} \right]^2 \\ \left[ \frac{\partial I_T}{\partial X_f} \right]^2 &= \left[ \frac{0 - (2 \cdot t_1 + 2 \cdot t_2) \cdot P_e \cdot r_e^2 \cdot t_1^2 \cdot t_2}{[2 \cdot X_f \cdot (t_1 + t_2)]^2} \right]^2 \end{aligned}$$

Evaluando la expresión anterior para los dos tamaños de muestra usados tenemos que:

$$\begin{aligned} \text{Turismo: } u_c^2(I_T) &= \\ \left[ \frac{\partial I_T}{\partial P_e} \right]^2 \cdot 0,12 &+ \left[ \frac{\partial I_T}{\partial r_e} \right]^2 \cdot 6,25 \cdot E^{-10} + \left[ \frac{\partial I_T}{\partial t_1} \right]^2 \cdot 2,50 \cdot E^{-5} + \left[ \frac{\partial I_T}{\partial t_2} \right]^2 \cdot 2,50 \cdot E^{-5} + \left[ \frac{\partial I_T}{\partial X_f} \right]^2 \cdot 5,29 \cdot E^{-8} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Camión: } u_c^2(I_T) &= \\ \left[ \frac{\partial I_T}{\partial P_e} \right]^2 \cdot 0,12 &+ \left[ \frac{\partial I_T}{\partial r_e} \right]^2 \cdot 6,25 \cdot E^{-10} + \left[ \frac{\partial I_T}{\partial t_1} \right]^2 \cdot 2,50 \cdot E^{-5} + \left[ \frac{\partial I_T}{\partial t_2} \right]^2 \cdot 2,50 \cdot E^{-5} + \left[ \frac{\partial I_T}{\partial X_f} \right]^2 \cdot 4,84 \cdot E^{-8} \end{aligned}$$

Para el cálculo de esta variable se han realizado 10 mediciones y obtenido el valor medio del mismo, por tanto, se deberá calcular la incertidumbre para cada repetición y para el valor medio de incertidumbre usaremos la siguiente expresión:

$$\overline{u_c^2(I_T)} = \frac{u_c^2(I_T)}{\sqrt{10}}$$

Evaluando la expresión anterior con los distintos valores de  $I_T$  obtenidos para cada ensayo de inercia realizado para la obtención de la inercia del neumático tenemos que:

$$\text{Turismo: } \overline{u_c^2(I_T)} = \frac{1,68 \cdot E^{-4}}{\sqrt{10}} = 5,31 \cdot E^{-5}$$

$$\text{Camión: } \overline{u_c^2(I_T)} = \frac{2,24 \cdot E^{-2}}{\sqrt{10}} = 7,09 \cdot E^{-3}$$

### B.1.10. Cálculo de $u_c^2(I_D)$

La incertidumbre de medida asociada a la inercia del tambor viene dada por la inercia reducida del mismo, pero para evaluar su incertidumbre se ha decidido simplificar el cálculo según la siguiente expresión:

$$I_{R_D} = m_R \cdot R^2$$

Donde,

$I_{R_D}$ , es la inercia reducida del tambor de ensayo, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .

$m_R$ , es la masa del tambor de ensayos, en kg.

$R$ , es el radio del tambor de ensayos, en m.

Tomando como constantes la relación de transmisión, la inercia del motor y la inercia de la polea de salida del motor, he analizado la posible incertidumbre en la inercia del tambor debida a la diferencia entre el valor obtenido de los cálculos geométricos de los planos y la inercia real obtenida tras la fabricación. Se ha considerado que la incertidumbre asociada a la inercia tiene el mismo orden de magnitud que la incertidumbre asociada al perímetro para una sola medida.

Finalmente, se ha determinado la incertidumbre del tambor, como la incertidumbre propagada de la incertidumbre expandida del equipo utilizado para medir el perímetro exterior del rodillo, y una incertidumbre del 1%, aplicada al valor de la masa calculado, a partir de la geometría 3D de la máquina. Considerando la masa  $m_R = 1488,67 \text{ kg}$  y el radio  $R = 0,85 \text{ m}$ , la incertidumbre propagada para esta última expresión queda de la siguiente manera:

$$u_c^2(I_{R_D}) = \left[ \frac{\partial I_{R_D}}{\partial R} \right]^2 \cdot u_c^2(R) + \left[ \frac{\partial I_{R_D}}{\partial m_R} \right]^2 \cdot u_c^2(m_R)$$

$$u_c^2(I_{R_D}) = [2 \cdot m_R \cdot R]^2 \cdot 1,19 \cdot E^{-8} + [R^2]^2 \cdot 55,40$$

Evaluando la expresión anterior con los valores de las variables asociadas tenemos que:

$$u_c^2(I_{R_D}) = 40,10$$

### B.1.11. Cálculo de $u_c^2(j_V)$

En este caso la deceleración calculada viene definida por ajuste por mínimos cuadrados de la curva de velocidad angular más próxima a los datos de los ensayos obtenidos, en este caso se ha aproximado a una recta  $y = m \cdot x + b$ . Una vez obtenida la recta se ha derivado para obtener la deceleración buscada. Estas expresiones han sido las utilizadas para evaluar la

incertidumbre:

$$\omega_V = m_V \cdot t_V + b_V$$

$$j_V = \frac{d\omega_V}{dt_V} = \frac{d(m_V \cdot t_V + b_V)}{dt_V} = m_V$$

Existe una incertidumbre asociada a cada parámetro de la regresión lineal realizada. Estas incertidumbres vienen determinadas a partir de un equivalente a la desviación estándar para ajuste por mínimos cuadrados ( $S_\omega$ ). Los valores de las incertidumbres y la desviación vienen determinados por las siguientes expresiones:

$$I_{m_V} = S_\omega \cdot \sqrt{\frac{N}{N \cdot \sum_{i=1}^N t_{V_i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N t_{V_i}\right)^2}} \quad (\text{B.4})$$

$$I_{b_V} = S_\omega \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N t_{V_i}^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N t_{V_i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N t_{V_i}\right)^2}} \quad (\text{B.5})$$

$$S_\omega = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\omega_{V_i} - m_V \cdot t_{V_i} - b_V)}{N - 2}} \quad (\text{B.6})$$

Para las constantes que intervienen en los cálculos he optado por elegir unos valores representativos de todos los ensayos realizados, valores obtenidos tanto en los ensayos de turismo y como en los de camión. Como la variable buscada es la deceleración y esta se ha obtenido derivando la curva de la velocidad, observamos que el término correspondiente a la ordenada en el origen desaparece, quedando únicamente el término asociado a la pendiente. Por tanto, la única incertidumbre que tendré en cuenta es la asociada a la pendiente de la curva de velocidad angular y su incertidumbre propagada debido a la derivada de la expresión que la representa.

$$\text{Turismo } (m_V = j_V = -0,09) : u_c^2(m_V) = 1,00 \cdot E^{-8}$$

$$\text{Camión } (m_V = j_V = -0,35) : u_c^2(m_V) = 5,63 \cdot E^{-7}$$

Por otro lado, la incertidumbre expandida del equipo usado según el certificado del fabricante del tacómetro usado para medir la velocidad angular ha sido la siguiente:

$$I_t = 0,63 \% \cdot j_V$$

$$\text{Turismo } (j_V = -0,09) : u_c^2(j_t) = 8,04 \cdot E^{-8}$$

$$\text{Camión } (j_V = -0,09) : u_c^2(j_t) = 1,22 \cdot E^{-6}$$

La incertidumbre combinada de estas dos fuentes de incertidumbre antes mencionadas se ha sumado quedando la expresión de la siguiente manera:

$$u_c^2(j_V) = u_c^2(m_V) + u_c^2(j_t)$$

Evaluando la expresión anterior con los distintos valores de obtenidos para cada tipo de ensayo tenemos que:

$$\text{Turismo: } u_c^2(j_V) = 9,04 \cdot E^{-8}$$

$$\text{Camión: } u_c^2(j_V) = 1,78 \cdot E^{-6}$$

### B.1.12. Cálculo de $u_c^2(j_{V0})$

Del mismo modo se ha obtenido estas expresiones han sido las utilizadas para evaluar la incertidumbre de la curva de deceleración del ensayo de pérdidas:

$$\omega_{V0} = m_{V0} \cdot t_{V0} + b_{V0}$$

$$j_{V0} = \frac{d\omega_{V0}}{dt_{V0}} = m_{V0}$$

Los valores de las incertidumbres y la desviación vienen determinados por las mismas expresiones del apartado anterior. Los valores representativos obtenidos tanto en los ensayos de turismo y como en los de camión, así como la incertidumbre propagada será:

$$\text{Turismo } (m_{V0} = j_{V0} = -0,05 \text{ rad/s}^2) : u_c^2(m_{V0}) = 5,63 \cdot E^{-9}$$

$$\text{Camión } (m_{V0} = j_{V0} = -0,04 \text{ rad/s}^2) : u_c^2(m_{V0}) = 2,50 \cdot E^{-9}$$

Y la incertidumbre expandida debida a los equipos en este caso ha sido:

$$\text{Turismo } (j_{V0} = -0,05 \text{ rad/s}^2) : u_c^2(j_{t0}) = 2,48 \cdot E^{-8}$$

$$\text{Camión } (j_{V0} = -0,04 \text{ rad/s}^2) : u_c^2(j_{t0}) = 1,59 \cdot E^{-8}$$

La incertidumbre combinada de estas dos fuentes de incertidumbre antes mencionadas se ha sumado quedando la expresión de la siguiente manera:

$$u_c^2(j_{V0}) = u_c^2(m_{V0}) + u_c^2(j_{t0})$$

Evaluando la expresión anterior con los distintos valores de obtenidos para cada tipo de ensayo tenemos que:

$$\text{Turismo: } u_c^2(j_{V0}) = 3,04 \cdot E^{-8}$$

$$\text{Camión: } u_c^2(j_{V0}) = 1,84 \cdot E^{-8}$$

### B.1.13. Cálculo de $u_c^2(L_D)$

Ahora damos paso al cálculo de las cuatro variables que componen la fuerza de resistencia a la rodadura agrupadas en la fórmula B.3. En este caso, la variable calculada va a ser el termino de fuerza del tambor en ensayo con carga y viene definida por la siguiente expresión:

$$L_D = \frac{I_{R_D}}{R} \cdot j_V$$

A continuación, se mostrarán las constantes que intervienen en los cálculos posteriores, valores representativos de todos los ensayos realizados tanto para turismo como para camión:

- Deceleración turismo:  $j_V = -0,09 \text{ rad/s}^2$
- Deceleración camión:  $j_V = -0,35 \text{ rad/s}^2$
- Inercia reducida del tambor:  $I_{R_D} = 625 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Radio del tambor:  $R = 0,85 \text{ m}$

Como ya tenemos las incertidumbres de las variables antes calculadas, la incertidumbre propagada deberá calcularse mediante la expresión antes mencionada, quedando en particular para esta última expresión de la siguiente manera:

$$u_c^2(L_D) = \left[ \frac{\partial L_D}{\partial I_{R_D}} \right]^2 \cdot u_c^2(I_{R_D}) + \left[ \frac{\partial L_D}{\partial R} \right]^2 \cdot u_c^2(R) + \left[ \frac{\partial L_D}{\partial j_V} \right]^2 \cdot u_c^2(j_V)$$

$$\text{Turismo: } u_c^2(L_D) = \left[ \frac{j_V}{R} \right]^2 \cdot 40,10 + \left[ -\frac{I_{R_D} \cdot j_V}{R^2} \right]^2 \cdot 4,74 \cdot E^{-4} + \left[ \frac{I_{R_D}}{R} \right]^2 \cdot 9,04 \cdot E^{-8}$$

$$\text{Camión: } u_c^2(L_D) = \left[ \frac{j_V}{R} \right]^2 \cdot 40,10 + \left[ -\frac{I_{R_D} \cdot j_V}{R^2} \right]^2 \cdot 4,74 \cdot E^{-4} + \left[ \frac{I_{R_D}}{R} \right]^2 \cdot 1,78 \cdot E^{-6}$$

Evaluando la expresión anterior con los distintos valores de obtenidos para cada tipo de ensayo tenemos que:

$$\text{Turismo: } u_c^2(L_D) = 0,50$$

$$\text{Camión: } u_c^2(L_D) = 7,80$$

### B.1.14. Cálculo de $u_c^2(L_T)$

En este caso, la variable calculada va a ser el termino de fuerza del neumático en ensayo con carga y viene definida por la siguiente expresión:

$$L_T = \frac{R \cdot I_T}{R_r^2} \cdot j_V$$

A continuación, se mostrarán las constantes que intervienen en los cálculos posteriores, valores representativos de todos los ensayos realizados tanto para turismo como para camión:

- Deceleración turismo:  $j_V = -0,09 \text{ rad/s}^2$
- Deceleración camión:  $j_V = -0,35 \text{ rad/s}^2$
- Inercia reducida del neumático de turismo:  $I_T = 1,70 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Inercia reducida del neumático de camión:  $I_T = 17,20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Radio en carga de turismo:  $R_r = 0,285 \text{ m}$
- Radio en carga de camión:  $R_R = 0,479 \text{ m}$
- Radio del tambor:  $R = 0,85 \text{ m}$

Como ya tenemos las incertidumbres de las variables antes calculadas, la incertidumbre propagada deberá calcularse mediante la expresión antes mencionada, quedando en particular para esta última expresión de la siguiente manera:

$$u_c^2(L_T) = \left[ \frac{\partial L_T}{\partial I_T} \right]^2 \cdot u_c^2(I_T) + \left[ \frac{\partial L_T}{\partial R} \right]^2 \cdot u_c^2(R) + \left[ \frac{\partial L_T}{\partial R_r} \right]^2 \cdot u_c^2(R_r) + \left[ \frac{\partial L_T}{\partial j_V} \right]^2 \cdot u_c^2(j_V)$$

Turismo:

$$u_c^2(L_T) = \left[ \frac{R \cdot j_V}{R_r^2} \right]^2 \cdot 5,31 \cdot E^{-5} + \left[ \frac{I_T \cdot j_V}{R_r^2} \right]^2 \cdot 4,74 \cdot E^{-4} + \left[ -\frac{2 \cdot R \cdot I_T \cdot j_V}{R_r} \right]^2 \cdot 1,88 \cdot E^{-3} + \left[ \frac{R \cdot I_T}{R_r^2} \right]^2 \cdot 9,04 \cdot E^{-8}$$

Camión:

$$u_c^2(L_T) = \left[ \frac{R \cdot j_V}{R_r^2} \right]^2 \cdot 7,09 \cdot E^{-3} + \left[ \frac{I_T \cdot j_V}{R_r^2} \right]^2 \cdot 4,74 \cdot E^{-4} + \left[ -\frac{2 \cdot R \cdot I_T \cdot j_V}{R_r} \right]^2 \cdot 1,88 \cdot E^{-3} + \left[ \frac{R \cdot I_T}{R_r^2} \right]^2 \cdot 1,78 \cdot E^{-6}$$

Evaluando la expresión anterior con los distintos valores de obtenidos para cada tipo de ensayo tenemos que:

$$\text{Turismo: } u_c^2(L_T) = 0,00$$

$$\text{Camión: } u_c^2(L_T) = 0,01$$

**B.1.15. Cálculo de  $u_c^2(L_{D0})$** 

A continuación, la variable calculada va a ser el termino de fuerza del tambor en ensayo sin carga, que viene definida por la siguiente expresión:

$$L_{D0} = \frac{I_{RD}}{R} \cdot j_{V0}$$

A continuación, se mostrarán las constantes que intervienen en los cálculos posteriores, valores representativos de todos los ensayos realizados tanto para turismo como para camión:

- Deceleración turismo:  $j_{V0} = -0,05 \text{ rad/s}^2$
- Deceleración camión:  $j_{V0} = -0,04 \text{ rad/s}^2$
- Inercia reducida del tambor:  $I_{RD} = 625 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Radio del tambor:  $R = 0,85 \text{ m}$

Como ya tenemos las incertidumbres de las variables antes calculadas, la incertidumbre propagada deberá calcularse mediante la expresión antes mencionada, quedando en particular para esta última expresión de la siguiente manera:

$$u_c^2(L_{D0}) = \left[ \frac{\partial L_{D0}}{\partial I_{RD}} \right]^2 \cdot u_c^2(I_{RD}) + \left[ \frac{\partial L_{D0}}{\partial R} \right]^2 \cdot u_c^2(R) + \left[ \frac{\partial L_{D0}}{\partial j_{V0}} \right]^2 \cdot u_c^2(j_{V0})$$

$$\text{Turismo: } u_c^2(L_{D0}) = \left[ \frac{j_{V0}}{R} \right]^2 \cdot 40,10 + \left[ -\frac{I_{RD} \cdot j_{V0}}{R^2} \right]^2 \cdot 4,74 \cdot E^{-4} + \left[ \frac{I_{RD}}{R} \right]^2 \cdot 3,04 \cdot E^{-8}$$

$$\text{Camión: } u_c^2(L_{D0}) = \left[ \frac{j_{V0}}{R} \right]^2 \cdot 40,10 + \left[ -\frac{I_{RD} \cdot j_{V0}}{R^2} \right]^2 \cdot 4,74 \cdot E^{-4} + \left[ \frac{I_{RD}}{R} \right]^2 \cdot 1,84 \cdot E^{-8}$$

Evalutando la expresión anterior con los distintos valores de obtenidos para cada tipo de ensayo tenemos que:

$$\text{Turismo: } u_c^2(L_{D0}) = 0,16$$

$$\text{Camión: } u_c^2(L_{D0}) = 0,10$$

**B.1.16. Cálculo de  $u_c^2(L_{T0})$** 

En este caso, la variable calculada va a ser el termino de fuerza del neumático en ensayo sin carga, que vendrá definida por la siguiente expresión:

$$L_{T0} = \frac{R \cdot I_T}{R_{r0}^2} \cdot j_{V0}$$

A continuación, se mostrarán las constantes que intervienen en los cálculos posteriores, valores representativos de todos los ensayos realizados tanto para turismo como para camión:

- Deceleración turismo:  $j_{V0} = -0,09 \text{ rad/s}^2$
- Deceleración camión:  $j_{V0} = -0,35 \text{ rad/s}^2$
- Inercia reducida del neumático de turismo:  $I_T = 1,70 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Inercia reducida del neumático de camión:  $I_T = 17,20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Radio sin carga de turismo:  $R_{r0} = 0,311 \text{ m}$
- Radio sin carga de camión:  $R_{r0} = 0,507 \text{ m}$
- Radio del tambor:  $R = 0,85 \text{ m}$

Como ya tenemos las incertidumbres de las variables antes calculadas, la incertidumbre propagada deberá calcularse mediante la expresión antes mencionada, quedando en particular para esta última expresión de la siguiente manera:

$$u_c^2(L_{T0}) = \left[ \frac{\partial L_{T0}}{\partial I_T} \right]^2 \cdot u_c^2(I_T) + \left[ \frac{\partial L_{T0}}{\partial R} \right]^2 \cdot u_c^2(R) + \left[ \frac{\partial L_{T0}}{\partial R_{r0}} \right]^2 \cdot u_c^2(R_{r0}) + \left[ \frac{\partial L_{T0}}{\partial j_{V0}} \right]^2 \cdot u_c^2(j_{V0})$$

$$\text{Turismo: } u_c^2(L_{T0}) = \left[ \frac{R \cdot j_{V0}}{R_{r0}^2} \right]^2 \cdot 5,31 \cdot E^{-5} + \left[ \frac{I_T \cdot j_{V0}}{R_{r0}^2} \right]^2 \cdot 4,74 \cdot E^{-4} + \left[ -\frac{2 \cdot R \cdot I_T \cdot j_{V0}}{R_{r0}} \right]^2 \cdot 3,06 \cdot E^{-3} + \left[ \frac{R \cdot I_T}{R_{r0}^2} \right]^2 \cdot 3,04 \cdot E^{-8}$$

$$\text{Camión: } u_c^2(L_{T0}) = \left[ \frac{R \cdot j_{V0}}{R_{r0}^2} \right]^2 \cdot 7,09 \cdot E^{-3} + \left[ \frac{I_T \cdot j_{V0}}{R_{r0}^2} \right]^2 \cdot 4,74 \cdot E^{-4} + \left[ -\frac{2 \cdot R \cdot I_T \cdot j_{V0}}{R_{r0}} \right]^2 \cdot 5,68 \cdot E^{-3} + \left[ \frac{R \cdot I_T}{R_{r0}^2} \right]^2 \cdot 1,84 \cdot E^{-8}$$

Evaluando la expresión anterior con los distintos valores de obtenidos para cada tipo de ensayo tenemos que:

$$\text{Turismo: } u_c^2(L_{T0}) = 0,00$$

$$\text{Camión: } u_c^2(L_{T0}) = 0,00$$

### B.1.17. Cálculo de $u_c^2(CRR)$

Ahora damos paso al cálculo de la incertidumbre asociada a la fórmula del CRR. En este caso, la variable calculada viene definida por la siguiente expresión B.3.

A continuación, se mostrarán las constantes que intervienen en los cálculos posteriores, valores representativos de todos los ensayos realizados tanto para turismo como para camión:

- Factor de corrección turismo:  $K_{fc} = 0,92$
- Factor de corrección camión:  $K_{fc} = 0,89$
- Carga de ensayo de turismo:  $L_m = 4,40$  kN
- Carga de ensayo de camión:  $L_m = 31,47$  kN
- Término de fuerza del tambor en ensayo con carga de turismo:  $L_D = 66,18$  N
- Término de fuerza del tambor en ensayo con carga de camión:  $L_D = 257,35$  N
- Término de fuerza del tambor en ensayo sin carga de turismo:  $L_{D0} = 1,44$  N
- Término de fuerza del tambor en ensayo sin carga de camión:  $L_{D0} = 22,30$  N
- Término de fuerza del neumático en ensayo con carga de turismo:  $L_T = 36,76$  N
- Término de fuerza del neumático en ensayo con carga de camión:  $L_T = 29,41$  N
- Término de fuerza del neumático en ensayo sin carga de turismo:  $L_{T0} = 0,73$  N
- Término de fuerza del neumático en ensayo sin carga de camión:  $L_{T0} = 2,21$  N

Como ya tenemos las incertidumbres de las variables antes calculadas, la incertidumbre propagada deberá calcularse mediante la expresión antes mencionada, quedando en particular para esta última expresión de la siguiente manera:

$$u_c^2(CRR) = \left[ \frac{\partial CRR}{\partial K_{fc}} \right]^2 \cdot u_c^2(K_{fc}) + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_m} \right]^2 \cdot u_c^2(L_m) + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_D} \right]^2 \cdot u_c^2(L_D) + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_T} \right]^2 \cdot u_c^2(L_T) + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_{D0}} \right]^2 \cdot u_c^2(L_{D0}) + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_{T0}} \right]^2 \cdot u_c^2(L_{T0})$$

$$\left[ \frac{\partial CRR}{\partial K_{fc}} \right]^2 = \left[ \frac{L_D - L_T - L_{D0} - L_{T0}}{L_m} \right]^2$$

$$\left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_m} \right]^2 = \left[ -\frac{K_{fc}(L_D - L_T - L_{D0} - L_{T0})}{L_m^2} \right]^2$$

$$\left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_D} \right]^2 = \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_T} \right]^2 = \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_{D0}} \right]^2 = \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_{T0}} \right]^2 = \left[ \frac{K_{fc}}{L_m} \right]^2$$

$$\text{Turismo: } u_c^2(CRR) = \left[ \frac{\partial CRR}{\partial K_{fc}} \right]^2 \cdot 0,92 + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_m} \right]^2 \cdot 4,40 + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_D} \right]^2 \cdot 66,18 + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_T} \right]^2 \cdot 36,76 + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_{D0}} \right]^2 \cdot 1,44 + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_{T0}} \right]^2 \cdot 0,73$$

$$\text{Camión: } u_c^2(CRR) = \left[ \frac{\partial CRR}{\partial K_{fc}} \right]^2 \cdot 0,89 + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_m} \right]^2 \cdot 31,47 + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_D} \right]^2 \cdot 257,35 + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_T} \right]^2 \cdot$$

$$29,41 + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_{D0}} \right]^2 \cdot 22,30 + \left[ \frac{\partial CRR}{\partial L_{T0}} \right]^2 \cdot 2,21$$

Evaluando la expresión anterior con los distintos valores de obtenidos para cada tipo de ensayo tenemos que:

$$\text{Turismo: } u_c^2(CRR) = 0,03$$

$$\text{Camión: } u_c^2(CRR) = 0,01$$

### B.1.18. Resultado final de la incertidumbre

Del valor de incertidumbre del CRR antes calculado, la incertidumbre asociada al CRR una vez despejado el cuadrado es:

$$u_c(CRR) = \sqrt{u_c^2(CRR)}$$

$$\text{Turismo: } u_c(CRR) = 0,17\text{N/kN}$$

$$\text{Camión: } u_c(CRR) = 0,09\text{N/kN}$$

Teniendo en cuenta que se han realizado 3 repeticiones por cada muestra y usado el valor promedio para obtener conclusiones, la incertidumbre se verá reducida según la siguiente expresión:

$$\overline{u_c(CRR)} = \frac{u_c(CRR)}{\sqrt{3}}$$

$$\text{Turismo: } \overline{u_c(CRR)} = 0,10\text{N/kN}$$

$$\text{Camión: } \overline{u_c(CRR)} = 0,05\text{N/kN}$$

## B.2. Otras fuentes de incertidumbre

### B.2.1. Introducción

En este apartado se va a realizar una revisión de otras fuentes de incertidumbre que pueden afectar a los ensayos realizados, con la finalidad de mostrar una visión general de la precisión del método utilizado. La incertidumbre asociada a estas fuentes no ha sido determinada en este estudio, para lo que habría que haber alienado el banco de ensayos con un banco de ensayos patrón, por tanto, no serán tenidos en cuenta.

Si se determinase el CRR de un neumático durante su rodadura en un banco de ensayo de acuerdo a la norma ISO 28580:2009(E)[40], en una serie de laboratorios distintos, los

resultados de todos ellos mostrarían una dispersión. La desviación típica de estos niveles podría calcularse en función de la frecuencia según establece la misma norma o según la norma ISO 5725-4:1994[71].

### B.2.2. Montaje del neumático

Existe la posibilidad de que aparezcan pequeños desalineamientos debido al montaje del neumático en la llanta. Estos desalineamientos se pueden reducir controlando la excentricidad radial y el alabeo lateral de la llanta, del neumático y del conjunto montado. La norma ISO 28580:2009(E)[40] recomienda, para controlar estos desalineamientos, una excentricidad radial máxima: 0,5 mm y un alabeo lateral máximo: 0,5 mm.

Para lograr minimizar estos desalineamientos, se deberá utilizar una llanta en buenas condiciones de conservación, que no tenga daños o golpes que puedan producir vibraciones o excentricidades en los esfuerzos. Por otro lado, como el neumático no es habitual equilibrarlo, se deberá realizar un equilibrado del conjunto llanta-neumático una vez montado. Aun así, podrá aparecer una variabilidad en los resultados de la medida que puede estar asociado a la variabilidad introducida por las propias máquinas de equilibrado o por el operario que monta y equilibra el conjunto.

Para reducir la dispersión de los resultados asociados a estos desalineamientos, se recomienda utilizar una llanta de medidas recomendadas por la norma ETRTO[15]. En este mismo sentido, se recomienda realizar el montaje y equilibrado del neumático, con la contrapesas apropiadas, la misma máquina de equilibrar, las mismas herramientas y por el mismo operario, siguiendo para ello, la misma dinámica de montaje en todos los ensayos.

### B.2.3. Montaje del conjunto en máquina de ensayo

Las desviaciones angulares pueden llegar a ser muy importantes en el contacto neumático-tambor durante el ensayo en banco. Si no se tienen en cuenta, podrían producir pequeñas desviaciones en la medida de fuerza, debidas a la alineación del tambor de la máquina con neumático. Es por esto, que se debe llevar especial atención al montaje del conjunto llanta-neumático en el eje de ensayo, y este a su vez en la máquina.

La norma ISO 28580:2009(E)[40] nos recomienda, para el método de deceleración, tres tolerancias de ajuste:

- La dirección de la aplicación de carga en el neumático debe permanecer perpendicular a la superficie de ensayo y pasar por el centro de la rueda dentro de los límites de tolerancia 1 mrad.

- El plano de la rueda debe ser perpendicular a la superficie de ensayo con una tolerancia de 2 mrad.
- El plano del neumático debe ser paralelo a la dirección del movimiento de la superficie de ensayo, con una tolerancia de 1 mrad.

Para tratar de reducir estas desviaciones o mantenerlas controladas, el montaje del conjunto en el banco de ensayos se deberá realizar siempre sobre el mismo eje, montando siempre todo el patrón completo de tornillos. Por otro lado, se recomienda seguir la misma dinámica de montaje, llevando especial atención a que no surjan desalineamientos del eje al sujetarlos a al banco.

#### B.2.4. Presión

La presión de un neumático es otro de los factores influyentes en el CRR. Como ya se ha mostrado en el capítulo 2 la resistencia a la rodadura aumenta rápidamente a medida que disminuye la presión de los neumáticos. Mientras que una menor presión de los neumáticos, se reduce la compresión de la banda de rodadura en la zona de contacto, también aumente la flexión y el cizallamiento de la banda de rodadura, siendo el resultado final un aumento en la resistencia a la rodadura. Por el contrario, un aumento de presión puede producir una disminución de esta.

La variabilidad de estos efectos en el CRR se debe tener en cuenta en el desarrollo del propio procedimiento de ensayo descrito en la norma ISO 28580:2009(E)[40], junto con las verificaciones adicionales que estimemos oportunas para evitarlas. Para garantizar el equilibrio interno de presión de un neumático durante el ensayo, se debe respetar la etapa de calentamiento descrito en la norma y los tiempos de parada entre repeticiones.

La tolerancia máxima permitida en la medida de presión por la norma es de  $\pm 1$  kPa.

Para tener controlada esta tolerancia se debe evitar las pequeñas pérdidas de aire que pueden surgir de un mal ajuste del talón del neumático contra la pestaña de la llanta o debido a defectos en la válvula de hinchado. Para evitar estos problemas, se recomienda hacer un control de presión en cada ensayo con un manómetro calibrado, que consiste en, medir la presión del neumático 10 minutos antes de cada ensayo y justo antes del inicio del mismo. Adicionalmente, como medio de prevención, se recomienda cambiar la válvula de hinchado en cada ensayo.

Por otro lado, el aire de dentro del neumático se puede ver afectado por la temperatura ambiente o exterior. Por tanto, se recomienda acondicionar o aclimatar el neumático 24h antes de ser ensayado a una temperatura cercana a la temperatura de ensayo. Con esta medida, conseguiremos estabilizar la temperatura y la humedad, y por tanto la presión

interna del neumático.

### B.3. Conclusión

Por un lado, en este capítulo se ha expuesto la propagación de la incertidumbre expandida de la medida y determinado su valor para el proceso de obtención del CRR en el banco usado. Estos valores de incertidumbre determinados han sido de 0,05 N/kN para las muestras de camión y de 0,10 N/kN para las muestras turismo.

Por otro lado, hemos identificado otras posibles fuentes de incertidumbre, con el objeto de reducir al máximo la variabilidad de los resultados.

En contraposición, no se ha podido demostrar la exactitud de la medición del CRR debido a que el banco de ensayos usado no ha sido alineado. Pero a favor del método, conocidos estos valores de incertidumbre, se ha demostrado en el capítulo 3 que el método de medición empleado es repetible dentro los valores de precisión establecidos por la norma ISO 28580:2009(E)[40].

Si observamos la figura B.1, podríamos equiparar nuestro método de medición al representado en el gráfico de la izquierda, donde tenemos un CRR con un alto grado de precisión y cuya exactitud, ya sea alta o baja, no ha sido determinada.

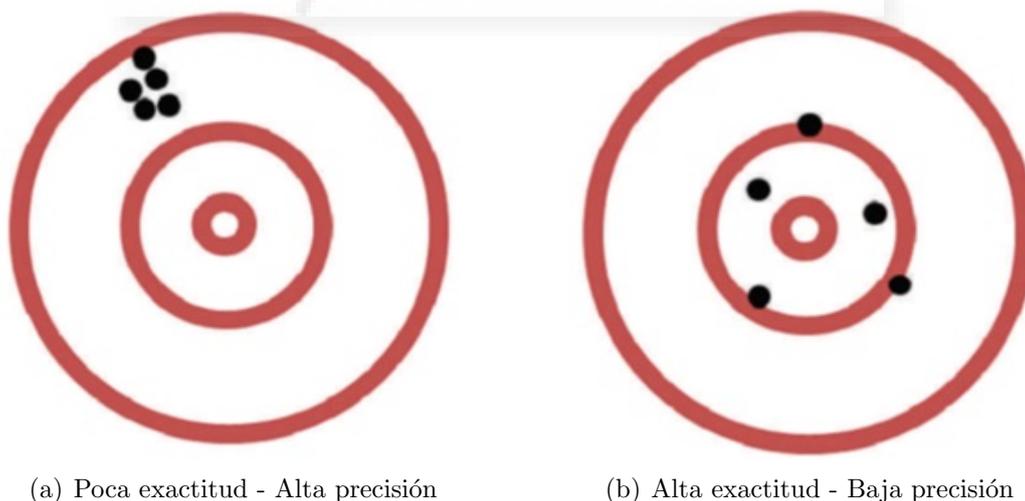


Figura B.1: Ejemplo exactitud y precisión de la medida

Esta exactitud o falta de ella puede ser tratada como factor de corrección para la obtención de un valor verdadero o exacto del CRR, y podría ser determinada con un procedimiento de alineado del banco de ensayos. Para ello, la norma ISO 28580:2009(E)[40] establece una serie de ensayos comparativos entre laboratorios. Otra alternativa para determinar esta veracidad, puede ser encontrada en la norma ISO 5725-4:1994[71].

En conclusión, se ha demostrado que el método no obtiene valores de CRR exactos, lo que podría llevarnos a tomar con precaución algunas de las conclusiones obtenidas. Además, esta falta de exactitud debe ser tenida en cuenta si vamos a realizar comparaciones con otras fuentes. Pero a favor del método, se ha demostrado que la precisión entre ensayos repetidos de un mismo neumático o neumáticos iguales es alta, lo que nos permite realizar comparaciones entre los resultados obtenidos con el banco de ensayos usado, los equipos de medición utilizados y el método desarrollado.



---

## Apéndice C

### Análisis estadístico de los resultados





## C.1. Introducción

Se han realizado varias pruebas estadísticas para garantizar la calidad de las afirmaciones y conclusiones realizadas en este estudio con respecto al CRR. Para ello me he ayudado del software comercial “*Statistical Package for the Social Sciences*” (SPSS) Advanced Statistics v24[72]. A continuación, se describirá el proceso realizado y los diferentes análisis implementados:

- En primer lugar, se mostrarán los cálculos de medias, errores típicos, varianzas y desviaciones típicas.
- En segundo lugar, una vez conocidos los estadísticos descriptivos anteriores, con el objetivo de validar la posibilidad de hacer pruebas de comparación entre muestras, comprobaremos si los datos obtenidos siguen una distribución normal, si existe homogeneidad entre las varianzas de los resultados que van a ser comparados y la robustez de dicha homogeneidad.
  - Para la verificación de ajuste de los datos a una distribución normal utilizaremos, para muestras de tamaño 5 o mayor, el parámetro estadístico Z de Kolmogorov-Smirnov para una muestra, contrastando el resultado frente a una distribución normal propuesta y observando el grado de ajuste. Para tamaños de muestra menores utilizaremos el estadístico W de Shapiro-Wilk para medir el grado de ajuste a una distribución normal, usado habitualmente para muestras de tamaño inferior a 50.
  - Por otro lado, comprobaremos la homogeneidad de las varianzas, también conocido estadísticamente como la homocedasticidad de los datos comparados. Para ello utilizaremos el parámetro estadístico de Levene, como análisis estadístico que compara medias entre grupos de muestras.
  - Finalmente, para medir la robustez de la homogeneidad entre varianzas utilizaremos el estadístico F de Brown-Forsythe, que mide el grado de igualdad entre las medias a través de las medianas de los grupos muestrales.
- En tercer lugar, una vez comprobada la normalidad y homocedasticidad de la medición, realizaremos pruebas “*T-student*” para dos muestras independientes, donde analizaremos el parámetro estadístico T en aquellas conclusiones de muestras comparadas por parejas. Para aquellas conclusiones en las que se hayan comparado tres o más muestras, se realizará un análisis de las varianzas tipo ANOVA, donde analizaremos el parámetro estadístico F de ANOVA para decidir si existe igualdad entre las muestras sometidos a la prueba.
- En cuarto lugar, se realizarán pruebas de posprocesado tras el ANOVA tipo HSD Tukey[70] con el objetivo de identificar subgrupos homogéneos y analizar su grado de igualdad ente medias. Esta herramienta nos puede ayudar a identificar grupos de muestras equivalentes e identificar de un vistazo el grado de igualdad ente las muestras analizadas.

- En quinto y último lugar, se realizarán análisis de covarianzas ente las principales variables obtenidas, ya sean medidas o calculadas y se analizará el grado de ajuste entre ellas a través del coeficiente de correlación de Pearson, en búsqueda de las correlaciones más fuertes.

## C.2. Estadísticos descriptivos

En la tabla C.1 se muestran los estadísticos descriptivos de las pruebas previas realizadas sobre el valor del CRR para una repetición del ensayo de pérdidas.

Tabla C.1: Estadísticos descriptivos CRR de camión - Pruebas previas para un ensayo de pérdidas

Referencia muestra	Nº repeticiones	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Error típico	Desviación típica	Varianza
UMH15EN035-1	3	0,060	7,182	7,242	7,213	0,017	0,030	0,001
UMH15EN035-2	3	0,141	7,077	7,218	7,160	0,042	0,073	0,005
UMH15EN035-3	3	0,185	7,014	7,198	7,134	0,060	0,104	0,011
UMH15EN035-Media	3	0,117	7,091	7,208	7,169	0,039	0,067	0,005

En las tablas C.2 y C.3 se muestran los estadísticos descriptivos de las pruebas previas realizadas sobre el valor del CRR para tres repeticiones del ensayo de pérdidas, tras cada repetición del ensayo.

Tabla C.2: Estadísticos descriptivos CRR de camión - Pruebas previas para tres ensayos de pérdidas

Referencia muestra	Nº repeticiones	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Error típico	Desviación típica	Varianza
UMH15EN035-1	3	0,061	7,168	7,229	7,207	0,020	0,034	0,001
UMH15EN035-2	3	0,139	7,062	7,201	7,144	0,042	0,073	0,005
UMH15EN035-3	3	0,194	6,995	7,190	7,119	0,062	0,108	0,012
UMH15EN035-Media	3	0,088	7,119	7,207	7,157	0,026	0,045	0,002

Tabla C.3: Estadísticos descriptivos CRR de turismo - Pruebas previas para tres ensayos de pérdidas

Referencia muestra	Nº repeticiones	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Error típico	Desviación típica	Varianza
UMH12EN086-1	3	0,085	8,333	8,417	8,389	0,028	0,049	0,002
UMH12EN086-2	3	0,095	8,407	8,503	8,461	0,028	0,049	0,002
UMH12EN086-3	3	0,146	8,256	8,402	8,317	0,044	0,076	0,006
UMH12EN086-Media	3	0,145	8,317	8,461	8,389	0,042	0,072	0,005

Referencia muestra	Nº repeticiones	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Error típico	Desviación típica	Varianza
UMH16EN063-1	3	0,300	6,035	6,335	6,222	0,094	0,163	0,027
UMH16EN063-2	3	0,212	6,195	6,407	6,320	0,064	0,111	0,012
UMH16EN063-3	3	0,253	6,100	6,353	6,268	0,084	0,145	0,021
UMH16EN063-Media	3	0,098	6,222	6,320	6,270	0,028	0,049	0,002

En las tablas C.4 y C.5 se muestran los estadísticos descriptivos más importantes de las medidas realizadas sobre el valor medio del CRR.

Tabla C.4: Estadísticos descriptivos del CRR de todas las muestras de camión

Grupo	Tamaño de la muestra	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Error típico	Desviación típica	Varianza
C3_N	12	0,235	4,633	4,868	4,709	0,022	0,077	0,006
C3_N_RASP	3	0,185	3,208	3,393	3,302	0,054	0,093	0,009
C3_N_REC1	3	0,056	7,527	7,583	7,563	0,018	0,032	0,001
C3_N_REC2	3	0,198	7,141	7,340	7,255	0,059	0,102	0,010
C3_N_REC3	3	0,075	7,589	7,664	7,633	0,023	0,039	0,002
C3_N_REC4	3	0,129	7,719	7,848	7,790	0,038	0,065	0,004
C3_U	6	0,742	3,656	4,398	4,000	0,137	0,336	0,113
C3_U_RASP	6	0,835	3,404	4,239	3,891	0,139	0,341	0,116
C3_U_REC	6	0,315	7,509	7,824	7,624	0,048	0,118	0,014

Tabla C.5: Estadísticos descriptivos del CRR de todas las muestras de turismo

Grupo	Tamaño de la muestra	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Error típico	Desviación típica	Varianza
C1_N1	4	0,304	7,891	8,195	8,058	0,063	0,125	0,016
C1_N1_RASP	4	0,244	5,567	5,811	5,698	0,058	0,117	0,014
C1_N1_REC	4	0,454	9,653	10,108	9,901	0,094	0,188	0,035
C1_N2	4	0,411	9,492	9,903	9,644	0,090	0,180	0,033
C1_N2_RASP	4	0,231	6,866	7,097	7,026	0,054	0,107	0,012
C1_N2_REC	4	0,486	11,862	12,348	12,007	0,114	0,229	0,052
C1_U	4	0,523	6,287	6,809	6,459	0,120	0,240	0,058
C1_U_RASP	4	0,308	4,913	5,221	5,116	0,069	0,138	0,019
C1_U_REC	4	0,678	9,391	10,070	9,699	0,169	0,338	0,114

### C.3. Pruebas de normalidad

Para la comprobación de si la distribución de datos obtenidos sigue una distribución normal hemos utilizado la prueba Kolmogorov-Smirnov para una muestra, con contraste normal. Esta prueba es un paso previo para poder realizar comparaciones T y ANOVA entre muestras.

Una alternativa para rangos de datos pequeños, menos de 50, es la prueba de contraste de hipótesis del estadístico de Shapiro-Wilk, que mide igualmente el grado de ajuste a una distribución normal. Esta prueba la podemos encontrar al mostrar los gráficos de normalidad con pruebas, en la herramienta explorar en la pestaña analizar estadísticos descriptivos.

Se somete el estadístico Z de Kolmogorov-Smirnov y el estadístico W de Shapiro-Wilk a un contraste de hipótesis. En este caso la hipótesis nula de que la distribución se aproxima a una distribución teórica normal. Siguiendo el siguiente criterio:

$\alpha \leq 0,05 \rightarrow$  Acepto hipótesis nula  $\rightarrow$  No se ajusta a una distribución normal  $\rightarrow$  NO

$\alpha > 0,05 \rightarrow$  Rechazo hipótesis nula  $\rightarrow$  Se ajusta a una distribución normal  $\rightarrow$  SI

En las tablas C.6 se muestran los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk correspondiente a las pruebas previas realizadas sobre el valor del CRR para una repetición del ensayo de pérdidas.

Tabla C.6: Normalidad del CRR pruebas previas un ensayo de pérdidas

Muestra ensayada-nº		UMH15EN035-1	UMH15EN035-2	UMH15EN035-3	UMH15EN035-Media
Nº de repeticiones		3	3	3	3
Parámetros normales (a,b)	Media	7,222	7,160	7,134	7,172
	Desviación típica	0,034	0,073	0,104	0,045
Diferencias más extremas	Absoluta	0,385	0,293	0,371	0,273
	Positiva	0,282	0,212	0,269	0,273
	Negativa	-0,385	-0,293	-0,371	-0,201
Z (Kolmogorov-Smirnov)		0,385	0,293	0,371	0,273
$\alpha$ (asintótica bilateral)		(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)
W (Shapiro-Wilk)		0,750	0,923	0,784	0,945
$\alpha$ (Shapiro-Wilk)		0,077	0,462	0,077	0,550
¿SE CUMPLE LA HIPÓTESIS		SI	SI	SI	SI
a. La distribución de prueba es normal. b. Se calcula a partir de datos. c. Corrección de significación de Lilliefors. d. La significación no se puede calcular porque la suma de las ponderaciones de casos es menor que 5. e. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.					

En las tablas C.7, C.8 y C.9 se muestran las pruebas de normalidad de las pruebas previas realizadas sobre el valor del CRR para tres repeticiones del ensayo de pérdidas, tras cada repetición del ensayo.

Tabla C.7: Normalidad del CRR de camión - Pruebas previas tres ensayos de pérdidas

Muestra ensayada-nº		UMH15EN035-1	UMH15EN035-2	UMH15EN035-3	UMH15EN035-Media
Nº de repeticiones		3	3	3	3
Parámetros normales (a,b)	Media	7,207	7,144	7,119	7,157
	Desviación típica	0,034	0,073	0,108	0,045
Diferencias más extremas	Absoluta	0,363	0,301	0,357	0,277
	Positiva	0,261	0,217	0,257	0,277
	Negativa	-0,363	-0,301	-0,357	-0,203
Z (Kolmogorov-Smirnov)		0,363	0,301	0,357	0,277
$\alpha$ (asintótica bilateral)		(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)
W (Shapiro-Wilk)		0,803	0,912	0,814	0,941
$\alpha$ (Shapiro-Wilk)		0,121	0,425	0,148	0,531
¿SE CUMPLE LA HIPÓTESIS		SI	SI	SI	SI
a. La distribución de prueba es normal. b. Se calcula a partir de datos. c. Corrección de significación de Lilliefors. d. La significación no se puede calcular porque la suma de las ponderaciones de casos es menor que 5. e. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.					

A continuación, en las tablas C.10 y C.11 se muestran las pruebas de normalidad de las medidas realizadas sobre el valor medio del CRR.

Finalmente, observando los resultados de las tablas anteriores para el estadístico Z, en los casos que se ha podido calcular la significación, SI podríamos asumir que las distribuciones son normales. En el resto de casos, no se puede calcular por que el tamaño de la muestra es inferior al permitido. Como alternativa, podemos valorar el estadístico de Shapiro-Wilk, que también indica normalidad en el conjunto de datos y, si se cumple esta hipótesis, también

Tabla C.8: Normalidad del CRR de turismo - Pruebas previas tres ensayos de pérdidas (1 de 2)

Muestra ensayada-nº	UMH12EN086-1	UMH12EN086-2	UMH12EN086-3	UMH12EN086-Media	
Nº de repeticiones	3	3	3	3	
Parámetros normales (a,b)	Media	8,389	8,461	8,317	8,389
	Desviación típica	0,049	0,049	0,076	0,072
Diferencias más extremas	Absoluta	0,382	0,265	0,293	0,175
	Positiva	0,279	0,198	0,293	0,175
	Negativa	-0,382	-0,265	-0,212	-0,175
Z (Kolmogorov-Smirnov)	0,382	0,265	0,293	0,175	
$\alpha$ (asintótica bilateral)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	
W (Shapiro-Wilk)	0,756	0,953	0,922	1,000	
$\alpha$ (Shapiro-Wilk)	0,014	0,583	0,461	0,998	
¿SE CUMPLE LA HIPÓTESIS	NO	SI	SI	SI	
a. La distribución de prueba es normal. b. Se calcula a partir de datos. c. Corrección de significación de Lilliefors. d. La significación no se puede calcular porque la suma de las ponderaciones de casos es menor que 5. e. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.					

podríamos asumir distribuciones normales. Para los casos negativos, casos podemos suponer que como el proceso de obtención de resultados es igual que el resto de datos de mayor tamaño, cabe esperar que las distribuciones también sean normales.



Tabla C.9: Normalidad del CRR de turismo - Pruebas previas tres ensayos de pérdidas (2 de 2)

Muestra ensayada-nº		UMH16EN063-1	UMH16EN063-2	UMH16EN063-3	UMH16EN063-Media
Nº de repeticiones		3	3	3	3
Parámetros normales (a,b)	Media	6,222	6,320	6,268	6,270
	Desviación típica	0,163	0,111	0,145	0,049
Diferencias más extremas	Absoluta	0,341	0,301	0,382	0,183
	Positiva	0,244	0,217	0,279	0,183
	Negativa	-0,341	-0,301	-0,382	-0,180
Z (Kolmogorov-Smirnov)		0,341	0,301	0,382	0,183
$\alpha$ (asintótica bilateral)		(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)
W (Shapiro-Wilk)		0,846	0,911	0,757	0,999
$\alpha$ (Shapiro-Wilk)		0,230	0,422	0,016	0,930
¿SE CUMPLE LA HIPÓTESIS		SI	SI	NO	SI

a. La distribución de prueba es normal.  
b. Se calcula a partir de datos.  
c. Corrección de significación de Lilliefors.  
d. La significación no se puede calcular porque la suma de las ponderaciones de casos es menor que 5.  
e. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

Tabla C.10: Normalidad del CRR de todas las muestras de camión

Repetición y media		C3 N	C3 N RASP	C3 N REC1	C3 N REC2	C3 N REC3	C3 N REC4	C3 U	C3 U RASP	C3 U REC
Tamaño de las muestras		12	3	3	3	3	3	6	6	6
Parámetros normales (a,b)	Media	4,709	3,302	7,563	7,255	7,633	7,790	4,000	3,891	7,624
	Desviación típica	0,077	0,093	0,032	0,102	0,039	0,065	0,336	0,341	0,118
Diferencias más extremas	Absoluta	0,201	0,178	0,374	0,280	0,297	0,241	0,270	0,195	0,290
	Positiva	0,201	0,178	0,271	0,205	0,214	0,193	0,270	0,154	0,290
	Negativa	-0,162	-0,177	-0,374	-0,280	-0,297	-0,241	-0,201	-0,195	-0,165
Z (Kolmogorov-Smirnov)		0,201	0,178	0,374	0,280	0,297	0,241	0,270	0,195	0,290
$\alpha$ (Kolmogorov-Smirnov)		0,193	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	0,197	0,200	0,125
W (Shapiro-Wilk)		0,985	0,999	0,777	0,938	0,917	0,973	0,989	0,994	0,835
$\alpha$ (Shapiro-Wilk)		0,768	0,956	0,060	0,519	0,442	0,687	0,802	0,853	0,202
¿SE CUMPLE LA HIPÓTESIS		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI (c)	SI (c,e)	SI (c)

a. La distribución de prueba es normal.  
b. Se calcula a partir de datos.  
c. Corrección de significación de Lilliefors.  
d. La significación no se puede calcular porque la suma de las ponderaciones de casos es menor que 5.  
e. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

Tabla C.11: Normalidad del CRR de todas las muestras de turismo

Repetición y media		C1 N1	C1 N1 RASP	C1 N1 REC	C1 N2	C1 N2 RASP	C1 N2 REC	C1 U	C1 U RASP	C1 U REC
Tamaño de las muestras		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Parámetros normales (a,b)	Media	8,058	5,698	9,901	9,644	6,939	12,007	6,459	5,116	9,699
	Desviación típica	0,125	0,117	0,188	0,180	0,117	0,229	0,240	0,138	0,338
Diferencias más extremas	Absoluta	0,294	0,260	0,244	0,301	0,247	0,396	0,313	0,375	0,283
	Positiva	0,196	0,212	0,157	0,301	0,181	0,396	0,313	0,224	0,283
	Negativa	-0,294	-0,260	-0,244	-0,200	-0,247	-0,262	-0,236	-0,375	-0,225
Z (Kolmogorov-Smirnov)		0,294	0,260	0,244	0,301	0,247	0,396	0,313	0,375	0,283
$\alpha$ (asintótica bilateral)		(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)	(c,d)
W (Shapiro-Wilk)		0,930	0,901	0,966	0,875	0,925	0,730	0,816	0,797	0,862
$\alpha$ (Shapiro-Wilk)		0,593	0,437	0,817	0,318	0,567	0,024	0,135	0,097	0,269
¿SE CUMPLE LA HIPÓTESIS		SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI

a. La distribución de prueba es normal.  
b. Se calcula a partir de datos.  
c. Corrección de significación de Lilliefors.  
d. La significación no se puede calcular porque la suma de las ponderaciones de casos es menor que 5.

## C.4. Pruebas de homogeneidad y robustez de las varianzas

### C.4.1. Varianza entre repeticiones

En primer lugar, se ha realizado la prueba de Levene para comprobar la homogeneidad de las varianzas para las tres repeticiones de ensayo por muestra. Esto nos ayudará a determinar si las varianzas entre repeticiones son parecidas para poder realizar una media de las tres. Como refuerzo de esta prueba se comprueba el estadístico de Brown-Forsythe, que mide el grado de igualdad entre las medias. En SPSS[72], es uno de los resultados obtenidos de realizar una prueba ANOVA.

Se somete el estadístico F a un contraste de hipótesis. En este caso la hipótesis nula es que las varianzas no son iguales. Siguiendo el siguiente criterio:

$\alpha \leq 0,05 \rightarrow$  Acepto hipótesis nula  $\rightarrow$  No hay igualdad de varianzas  $\rightarrow$  NO

$\alpha > 0,05 \rightarrow$  Rechazo hipótesis nula  $\rightarrow$  Existe posibilidad de igualdad de varianzas  $\rightarrow$  SI

En las tablas C.12 y C.13 se muestran los resultados estadísticos de las pruebas previas realizadas sobre el valor del CRR para una repetición del ensayo de pérdidas y para tres ensayos de pérdidas.

Tabla C.12: Homogeneidad y robustez de la varianza del CRR de las pruebas previas de camión

Muestra ensayada	UMH15EN035	
Nº de ensayos de pérdidas	1	3
Nº de ensayos	3	3
Nº Repeticiones	3	3
F (Levene)	3,427	3,134
F (Brown-Forsythe)	0,855	1,028
$\alpha$ (Levene)	0,102	0,117
$\alpha$ (Brown-Forsythe)	0,491	0,437
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	SI	SI

Tabla C.13: Homogeneidad y robustez de la varianza del CRR de las pruebas previas de turismo

Muestra ensayada	UMH12EN086	UMH12EN063
Nº de ensayos de pérdidas	3	3
Nº de ensayos	3	3
Nº Repeticiones	3	3
F (Levene)	0,743	0,527
F (Brown-Forsythe)	4,475	0,362
$\alpha$ (Levene)	0,515	0,615
$\alpha$ (Brown-Forsythe)	0,077	0,712
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	SI	SI

Finalmente podríamos asumir que las varianzas son iguales y por tanto considerar la posibi-

lidad de realizar una media de las tres repeticiones para los siguientes cálculos y considerar válida la media como un valor representativo de la misma muestra.

### C.4.2. Varianza entre dos muestras

En segundo lugar, tras haber considerado válida la posibilidad de comparar entre las medias de las tres repeticiones, se ha comprobado la homogeneidad de las varianzas entre dos muestras de todas las combinaciones de datos sobre los que se han sacado conclusiones. Para ello se ha realizado la prueba con el estadístico de Levene para dos muestras. En SPSS[72], es uno de los resultados obtenidos de realizar una prueba "T-student" para dos muestras.

Se somete el estadístico F a un contraste de hipótesis. En este caso la hipótesis nula de que las varianzas no son iguales. Siguiendo el siguiente criterio:

$\alpha \leq 0,05 \rightarrow$  Acepto hipótesis nula  $\rightarrow$  No hay igualdad de varianzas  $\rightarrow$  NO

$\alpha > 0,05 \rightarrow$  Rechazo hipótesis nula  $\rightarrow$  Existe posibilidad de igualdad de varianzas  $\rightarrow$  SI

En las tablas C.14 y C.15 se muestran los resultados estadísticos para todas las muestras ensayadas.

Tabla C.14: Homogeneidad y robustez de la varianza del CRR de todas las muestras de camión

Muestras	C3_N	C3_N	C3_N	C3_N	C3_N	C3_U	C3_U
	vs C3_N_RASP	vs C3_N_REC1	vs C3_N_REC2	vs C3_N_REC3	vs C3_N_REC4	vs C3_U_RASP	vs C3_U_REC
Grupo SPSS	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	7-8	7-9
Tamaños de las muestras	12-3	12-3	12-3	12-3	12-3	6-6	6-6
F (Levene)	0,004	3,152	0,215	2,404	0,533	0,016	14,474
$\alpha$ (Levene)	0,948	0,099	0,650	0,145	0,478	0,902	0,003
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO

Muestras	C3_N_RASP	C3_N_REC1	C3_N_REC2	C3_N_REC3	C3_N_REC4
	vs C3_U_RASP	vs C3_U_REC	vs C3_U_REC	vs C3_U_REC	vs C3_U_REC
Grupo SPSS	2-8	3-9	4-9	5-9	6-9
Tamaños de las muestras	3-6	3-6	3-6	3-6	3-6
F (Levene)	5,561	3,744	0,197	3,195	1,535
$\alpha$ (Levene)	0,05	0,094	0,671	0,117	0,255
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	NO	SI	SI	SI	SI

Finalmente, en los casos afirmativos, podríamos asumir que las varianzas son iguales y podríamos considerar la posibilidad de realizar comparaciones entre las medias de los grupos de muestras de los resultados.

Tabla C.15: Homogeneidad y robustez de la varianza del CRR de todas las muestras de turismo

Muestras	C1_N1 vs C1_N1_RASP	C1_N1 vs C1_N1_REC	C1_N2 vs C1_N2_RASP	C1_N2 vs C1_N2_REC	C1_U vs C1_U_RASP	C1_U vs C1_U_REC
	Grupo SPSS	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
Nº Muestras comparadas	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4
F (Levene)	0,111	0,334	0,747	0,283	0,971	2,262
g (Levene)	0,750	0,584	0,421	0,614	0,383	0,183
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Muestras	C1_N1 vs C1_N2	C1_N1 vs C1_U	C1_N2 vs C1_U	C1_N1_RASP vs C1_N2_RASP	C1_N1_RASP vs C1_U_RASP	C1_N2_RASP vs C1_U_RASP	C1_N1_REC vs C1_N2_REC	C1_N1_REC vs C1_U_REC	C1_N2_REC vs C1_U_REC
	Grupo SPSS	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
Nº Muestras comparadas	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4
F (Levene)	0,505	1,435	0,307	0,339	0,009	0,231	0,291	5,339	2,900
g (Levene)	0,504	0,276	0,600	0,582	0,926	0,648	0,609	0,060	0,139
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

## C.5. Pruebas ANOVA

Se han realizado pruebas ANOVA para las pruebas previas realizadas. Se pretende demostrar si las medias de las tres repeticiones de cada ensayo, en la versión un ensayo de pérdidas y tres ensayos de pérdidas, son próximas y poder considerar todas las repeticiones como partes de una misma población y así poder utilizar el valor promedio de las tres repeticiones, como valor representativo de las mismas. Se somete el estadístico F a un contraste de hipótesis. En este caso la hipótesis nula de que las medias de las muestras no son iguales. Siguiendo el siguiente criterio:

$$\alpha \leq 0,05 \rightarrow \text{Acepto hipótesis nula} \rightarrow \text{No hay igualdad entre las medias} \rightarrow \text{NO}$$

$$\alpha > 0,05 \rightarrow \text{Rechazo hipótesis nula} \rightarrow \text{Existe posibilidad de igualdad de medias} \rightarrow \text{SI}$$

En las tablas C.16 y C.17 se muestran los resultados estadísticos de las pruebas previas realizadas sobre el valor del CRR para una repetición del ensayo de pérdidas y para tres ensayos de pérdidas.

Tabla C.16: ANOVA del CRR de las pruebas previas de camión

Muestra ensayada	UMH15EN035	
Nº de ensayos de pérdidas	1	3
Nº de ensayos	3	3
Nº Repeticiones	3	3
Z (Kolmogorov-Smirnov)	0,349	0,335
F (Levene)	3,427	3,134
F (ANOVA)	0,855	1,028
$\alpha$ (Kolmogorov-Smirnov)	0,002	0,004
$\alpha$ (Levene)	0,102	0,117
$\alpha$ (ANOVA)	0,471	0,413
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	SI	SI

Finalmente podríamos asumir que las medias entre grupos de muestras son iguales, por tanto, pueden ser consideradas como partes de una misma población. Al ser repeticiones de los

Tabla C.17: ANOVA del CRR de las pruebas previas de turismo

Muestra ensayada	UMH12EN086	UMH12EN063
Nº de ensayos de pérdidas	3	3
Nº de ensayos	3	3
Nº Repeticiones	3	3
Z (Kolmogorov-Smirnov)	0,230	0,247
F (Levene)	0,743	0,527
F (ANOVA)	4,475	0,362
$\alpha$ (Kolmogorov-Smirnov)	0,186	0,120
$\alpha$ (Levene)	0,515	0,615
$\alpha$ (ANOVA)	0,065	0,711
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	SI	SI

mismos ensayos se puede considerar la posibilidad de realizar una media de las tres repeticiones para los cálculos siguientes y considerar válida la media como un valor representativo de la misma muestra.

## C.6. Pruebas T para 2 muestras independientes

Tras haber considerado válida la posibilidad de comparar entre las medias de las tres repeticiones y cuantificar la igualdad de las medias de las muestras comparadas, así como valorar la certeza de nuestras afirmaciones, se han realizado una serie de pruebas "*T-student*". Se somete el estadístico T a un contraste de hipótesis. En este caso la hipótesis nula de que las medias de las muestras no son iguales. Siguiendo el siguiente criterio:

$$\alpha \leq 0,05 \rightarrow \text{Acepto hipótesis nula} \rightarrow \text{No hay igualdad entre las medias} \rightarrow \text{NO}$$

$$\alpha > 0,05 \rightarrow \text{Rechazo hipótesis nula} \rightarrow \text{Existe posibilidad de igualdad de medias} \rightarrow \text{SI}$$

En las tablas C.18 y C.19 se muestran los resultados estadísticos para todas las muestras ensayadas.

Finalmente, en los casos afirmativos, podríamos asumir que las medias entre grupos comparados son iguales, por tanto, pueden ser consideradas como partes de una misma población y sería arriesgado hacer comparaciones entre ellas. Por el contrario, en los casos negativos o considerados poco significativos, no habrá igualdad entre las medias de las muestras comparadas y, por tanto, podremos hacer comparaciones entre ellas al considerarse sus valores medios lo suficientemente diferentes.

Tabla C.18: Pruebas T del CRR de todas las muestras ensayadas de camión

Muestras	C3_N vs C3_N_RASP	C3_N vs C3_N_REC1	C3_N vs C3_N_REC2	C3_N vs C3_N_REC3	C3_N vs C3_N_REC4	C3_U vs C3_U_RASP	C3_U vs C3_U_REC
	Grupo SPSS	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	7-8
Tamaños de las muestras	12-3	12-3	12-3	12-3	12-3	6-6	6-6
T (varianzas iguales)	27,374	-61,444	-48,420	-62,470	-63,315	0,555	-24,954
T (varianzas diferentes)	24,279	-99,023	-40,320	-92,373	-70,311	0,555	-24,954
$\alpha$ (varianzas iguales)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,591	0,000
$\alpha$ (varianzas diferentes)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,591	0,000
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO

Muestras	C3_N_RASP vs C3_U_RASP	C3_N_REC1 vs C3_U_REC	C3_N_REC2 vs C3_U_REC	C3_N_REC3 vs C3_U_REC	C3_N_REC4 vs C3_U_REC
	Grupo SPSS	2-8	3-9	4-9	5-9
Tamaños de las muestras	3-6	3-6	3-6	3-6	3-6
T (varianzas iguales)	-2,853	-0,849	-4,592	0,126	2,221
T (varianzas diferentes)	-3,955	-1,178	-4,841	0,171	2,710
$\alpha$ (varianzas iguales)	0,025	0,424	0,003	0,903	0,062
$\alpha$ (varianzas diferentes)	0,007	0,282	0,006	0,869	0,031
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	NO	SI	NO	SI	SI

Tabla C.19: Pruebas T del CRR de todas las muestras ensayadas de turismo

Muestras	C1_N1 vs C1_N1_RASP	C1_N1 vs C1_N1_REC	C1_N2 vs C1_N2_RASP	C1_N2 vs C1_N2_REC	C1_U vs C1_U_RASP	C1_U vs C1_U_REC
	Grupo SPSS	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
Tamaños de las muestras	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4
T (varianzas iguales)	27,549	-16,312	24,943	-16,229	9,689	-15,618
T (varianzas diferentes)	27,549	-16,312	24,943	-16,229	9,689	-15,618
$\alpha$ (Levene)	0,750	0,584	0,421	0,614	0,383	0,183
$\alpha$ (varianzas iguales)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\alpha$ (varianzas diferentes)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Muestras	C1_N1 vs C1_N2	C1_N1 vs C1_U	C1_N2 vs C1_U	C1_N1_RASP vs C1_N2_RASP	C1_N1_RASP vs C1_U_RASP	C1_N2_RASP vs C1_U_RASP	C1_N1_REC vs C1_N2_REC	C1_N1_REC vs C1_U_REC	C1_N2_REC vs C1_U_REC
	Grupo SPSS	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
Tamaños de las muestras	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4	4-4
T (varianzas iguales)	-14,443	11,796	21,192	-16,748	6,428	21,831	-14,227	1,046	11,308
T (varianzas diferentes)	-14,443	11,796	21,192	-16,748	6,428	21,831	-14,227	1,046	11,308
$\alpha$ (Levene)	0,504	0,276	0,600	0,582	0,926	0,648	0,609	0,060	0,139
$\alpha$ (varianzas iguales)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,336	0,000
$\alpha$ (varianzas diferentes)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,336	0,000
¿CUMPLE HIPÓTESIS?	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO

## C.7. Posprocesado Tukey de ANOVA

En este apartado se mostrarán los resultados del posprocesado tipo Tukey[70] realizado sobre la prueba ANOVA para todas las muestras. Esta posprocesado da como resultado una tabla con los subgrupos homogéneos cuyos valores medios medias difieren en más de un nivel de confianza predefinido. El objetivo de esta prueba es ayudarnos a formar subgrupos de muestras que pueden pertenecer a una misma población y de este mismo modo, identificar de un vistazo el grado de igualdad ente las muestras analizadas.

A continuación en las tablas C.20 y C.23 veremos los resultados para las agrupaciones por valores de CRR, en las tablas C.21 y C.24 las agrupaciones por valores de masa, en las tablas C.22 y C.25 las agrupaciones por valores de diámetro exterior sin carga y en la tabla C.26 las agrupaciones por valores de temperatura. Esta última solo para los ensayos sobre muestras

de turismo.

Tabla C.20: Posprocesado HSD de Tukey del CRR para camión

CRR a 80 km/h (N/kN)					
HSD Tukey <sup>a,b</sup>					
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
C3_N_RASP	3	3,302			
C3_U_RASP	6		3,891		
C3_U	6		4,000		
C3_N	12			4,709	
C3_N_REC123	9				7,484
C3_N_REC1234	12				7,560
C3_U_REC	6				7,624
Significación		1,000	0,967	1,000	0,894

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,300.

b. Los tamaños de muestra no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de muestra. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla C.21: Posprocesado HSD de Tukey de la masa para camión

Masa (kg)						
HSD Tukey <sup>a,b</sup>						
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
C3_U_RASP	3	43,5				
C3_U_RASP	6	43,7				
C3_U	6		52,3			
C3_N	12			61,1		
C3_U_REC	6				63,2	
C3_N_REC1234	12					66,2
C3_N_REC123	9					66,3
Significación		0,998	1,000	1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,300.

b. Los tamaños de muestra no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de muestra. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla C.22: Posprocesado HSD de Tukey del diámetro exterior para camión

Diámetro sin carga (mm)					
HSD Tukey <sup>a,b</sup>					
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
C3_U_RASP	6	985,0			
C3_N_RASP	3	985,2			
C3_U	6		1001,9		
C3_N	12			1016,0	
C3_U_REC	6				1025,5
C3_N_REC1234	12				1027,8
C3_N_REC123	9				1028,4
Significación		1,000	1,000	1,000	0,622

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,300.

b. Los tamaños de muestra no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de muestra. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla C.23: Posprocesado HSD de Tukey del CRR para turismo

CRR a 80 km/h (N/kN)								
HSD Tukey <sup>a</sup>								
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
C1_U_RASP	4	5,116						
C1_N1_RASP	4		5,698					
C1_U	4			6,459				
C1_N2_RASP	4				6,939			
C1_N1	4					8,058		
C1_N2	4						9,644	
C1_U_REC	4						9,699	
C1_N1_REC	4						9,901	
C1_N2_REC	4							12,007
Significación		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,659	1,000

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.

Tabla C.24: Posprocesado HSD de Tukey de la masa para turismo

Masa (kg)							
HSD Tukey <sup>a</sup>							
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
C1_U_RASP	4	4,9					
C1_N1_RASP	4	5,0					
C1_N2_RASP	4		5,9				
C1_U	4			6,2			
C1_N1	4				7,2		
C1_N2	4					8,1	
C1_U_REC	4					8,1	
C1_N1_REC	4					8,2	
C1_N2_REC	4						9,4
Significación		0,866	1,000	1,000	1,000	0,670	1,000

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.

Tabla C.25: Posprocesado HSD de Tukey del diámetro exterior para turismo

Diámetro sin carga (mm)								
HSD Tukey <sup>a</sup>								
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
C1_N1_RASP	4	608,0						
C1_U_RASP	4	609,0						
C1_N2_RASP	4		613,0					
C1_U	4			617,4				
C1_N1	4				623,1			
C1_N1_REC	4					625,2		
C1_U_REC	4					626,1	626,1	
C1_N2_REC	4						628,1	628,1
C1_N2	4							628,2
Significación		0,720	1,000	1,000	1,000	0,886	0,057	1,000

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.  
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.



Tabla C.26: Posprocesado HSD de Tukey de la temperatura de banda para turismo

Temperatura de banda (°C)							
HSD Tukey <sup>a,b</sup>							
Referencia de muestra	Tamaño de muestra	Subconjunto para alfa = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
C1_U_RASP	4	35,0					
C1_N1_RASP	4	35,2	35,2				
C1_N2_RASP	4		37,3	37,3			
C1_U	4			37,9			
C1_N1	4				42,9		
C1_U_REC	4				43,3	43,3	
C1_N1_REC	4					45,5	45,5
C1_N2	4						46,0
C1_N2_REC	4						46,5
Significación		1,000	0,075	0,996	1,000	0,061	0,843

Se visualizan las medias para las muestras en los subconjuntos homogéneos.  
a Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,273.  
b Los tamaños de muestras no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de muestra Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

## C.8. Análisis de covarianzas

En este apartado se va analizar la posible correlación entre una serie de parámetros obtenidos antes, durante o al finalizar los ensayos de resistencia a la rodadura. Para este análisis vamos a utilizar el Coeficiente de Correlación de Pearson para analizar las covarianzas entre estos parámetros, utilizándolos como variables dentro de la matriz de correlación.

A continuación en las tablas C.27 y C.28, se mostrarán los resultados de todos los coeficientes de correlación de los parámetros analizados, tanto para las variables de camión como para las de turismo. Los valores pintados de color verde resaltarán los resultados que indican una correlación alta, en azul los que tiene una correlación moderada o baja, y en rojo los que no guardan ninguna correlación.



Tabla C.27: Análisis de covarianzas de camión

	CRR a 80 km/h	Masa	Perímetro	Diámetro sin carga	Profundidad banda	Profundidad dibujo	Temperatura hombro	Temperatura talón	Radio en carga	Ancho de sección	Profundidad flanco	Inercia	Rigidez	Fecha fabricación
CRR a 80 km/h	1,000	0,816	0,857	0,849	0,866	0,792	0,590	0,541	0,091	0,769	0,294	0,627	-0,352	-0,475
Masa	0,816	1,000	0,979	0,972	0,899	0,953	0,621	0,430	0,284	0,687	-0,233	0,880	-0,169	-0,144
Perímetro	0,857	0,979	1,000	0,980	0,940	0,960	0,552	0,404	0,300	0,696	-0,134	0,876	-0,174	-0,214
Diámetro sin carga	0,849	0,972	0,980	1,000	1,000	0,906	0,604	0,429	0,301	0,719	-0,145	0,846	-0,201	-0,133
Profundidad banda	0,866	0,899	0,940	1,000	1,000	0,904	0,416	0,428	0,040	0,346	0,282	0,699	-0,304	-0,770
Profundidad dibujo	0,792	0,953	0,960	0,906	0,904	1,000	0,263	0,241	0,080	0,160	0,106	0,852	-0,193	-0,882
Temperatura hombro	0,590	0,621	0,552	0,604	0,416	0,263	1,000	0,910	0,570	0,498	-0,064	0,434	0,001	0,066
Temperatura talón	0,541	0,430	0,404	0,429	0,428	0,241	0,910	1,000	0,395	0,463	0,241	0,219	-0,044	-0,021
Radio en carga	0,091	0,284	0,300	0,301	0,040	0,080	0,570	0,395	1,000	-0,142	-0,553	0,318	0,853	0,307
Ancho de sección	0,769	0,687	0,696	0,719	0,346	0,160	0,498	0,463	-0,142	1,000	0,535	0,335	-0,495	-0,046
Profundidad flanco	0,294	-0,233	-0,134	-0,145	0,282	0,106	-0,064	0,241	-0,553	0,535	1,000	-0,472	-0,510	-0,365
Inercia	0,627	0,880	0,876	0,846	0,699	0,852	0,434	0,219	0,318	0,335	-0,472	1,000	-0,070	-0,254
Rigidez	-0,352	-0,169	-0,174	-0,201	-0,304	-0,193	0,001	-0,044	0,853	-0,495	-0,510	-0,070	1,000	0,390
Fecha fabricación	-0,475	-0,144	-0,214	-0,133	-0,770	-0,882	0,066	-0,021	0,307	-0,046	-0,365	-0,254	0,390	1,000

Tabla C.27: Análisis de covarianzas de camión

Tabla C.28: Análisis de covarianzas de turismo

Tabla C.28: Análisis de covarianzas de turismo

	CRR a 80 km/h	Masa	Perímetro	Diámetro sin carga	Profundidad banda	Profundidad dibujo	Temperatura banda	Radio en carga	Ancho de sección	Profundidad flanco	Inercia	Rigidez	Fecha fabricación
CRR a 80 km/h	1,000	0,985	0,915	0,915	0,838	0,803	0,932	0,913	-0,092	0,779	0,955	0,403	-0,147
Masa	0,985	1,000	0,957	0,957	0,898	0,872	0,951	0,954	-0,030	0,791	0,981	0,417	-0,029
Perímetro	0,915	0,957	1,000	1,000	0,953	0,955	0,953	0,960	0,016	0,762	0,959	0,304	0,139
Diámetro sin carga	0,915	0,957	1,000	1,000	0,952	0,954	0,952	0,960	0,013	0,762	0,959	0,302	0,140
Profundidad banda	0,838	0,898	0,953	0,952	1,000	0,976	0,908	0,945	0,285	0,792	0,936	0,384	0,176
Profundidad dibujo	0,803	0,872	0,955	0,954	0,976	1,000	0,899	0,928	0,182	0,690	0,907	0,317	0,293
Temperatura banda	0,932	0,951	0,953	0,952	0,908	0,899	1,000	0,911	0,027	0,717	0,934	0,272	-0,070
Radio en carga	0,913	0,954	0,960	0,960	0,945	0,928	0,911	1,000	0,145	0,812	0,971	0,557	0,070
Ancho de sección	-0,092	-0,030	0,016	0,013	0,285	0,182	0,027	0,145	1,000	0,408	0,093	0,425	0,020
Profundidad flanco	0,779	0,791	0,762	0,762	0,792	0,690	0,717	0,812	0,408	1,000	0,814	0,507	-0,198
Inercia	0,955	0,981	0,959	0,959	0,936	0,907	0,934	0,971	0,093	0,814	1,000	0,462	0,049
Rigidez	0,403	0,417	0,304	0,302	0,384	0,317	0,272	0,557	0,425	0,507	0,462	1,000	-0,190
Fecha fabricación	-0,147	-0,029	0,139	0,140	0,176	0,293	-0,070	0,070	0,020	-0,198	0,049	-0,190	1,000



---

# Bibliografía

- [1] Reglamento (CE) nº 661/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de julio de 2009 relativo a los requisitos de homologación de tipo referentes a la seguridad general de los vehículos de motor, sus remolques y sistemas, componentes y unidades técnicas independientes a ellos destinados (Texto pertinente a efectos del EEE), 2009. URL <http://data.europa.eu/eli/reg/2009/661/2016-07-01>.
- [2] L. (Leonardo) Massai. *The Kyoto protocol in the EU: European community and member states under international and european law*. The Hague : T.M.C. Asser Press ; Berlin ; Heidelberg : Springer, 2011. URL <https://search.library.wisc.edu/catalog/9910114792202121>.
- [3] Marco Mammetti, David Gallegos, Alex Freixas, and Jordi Muñoz. The influence of rolling resistance on fuel consumption in heavy-duty vehicles. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 2013. doi: 10.4271/2013-01-1343. URL <http://dx.doi.org/10.4271/2013-01-1343>.
- [4] Ulf Sandberg. Models for rolling resistance in road infrastructure asset management systems (MIRIAM project). Deliverable 1: Rolling resistance. Basic information and state of the art on measurement methods. Technical report, Swedish National Road and Transport Research Institute, 2011.
- [5] Jörg Kühlwein. Driving resistances of light-duty vehicles in europe: present situation, trends, and scenarios for 2025. Technical report, International Council on Clean Transportation Europe, 2016.
- [6] Thomas Curry, Isaac Liberman, Lily Hoffman-Andrews, and Dana Lowell. Reduce aerodynamic drag & rolling resistance from heavy trucks: summary of available technologies & applicability to chinese trucks. International Council on Clean Transportation, October 2012.
- [7] Reglamento (CEPE/ONU) nº 30 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas: disposiciones uniformes para la homologación de neumáticos para vehículos de motor y sus remolques, 2007. URL <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs.html>.

- [8] Reglamento (CEPE) n° 54 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas: prescripciones uniformes relativas a la homologación de neumáticos para vehículos industriales y sus remolques, 2004. URL <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs.html>.
- [9] Reglamento (CEPE/ONU) n° 108 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas: prescripciones uniformes relativas a la homologación de la producción de neumáticos recauchutados para los vehículos automóviles y sus remolques, 2006. URL <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs.html>.
- [10] Reglamento (CEPE/ONU) n° 109 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas: prescripciones uniformes relativas a la homologación de la producción de neumáticos recauchutados para los vehículos industriales y sus remolques, 2006. URL <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs.html>.
- [11] Entidad nacional de acreditación (enac). dirección, c/ serrano 240, 3<sup>a</sup> 28016 madrid, teléfono +34 914573289 y email [administracion@enac.es](mailto:administracion@enac.es). URL <https://www.enac.es/>.
- [12] International Organization for Standardization (ISO). Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración, ISO/IEC 17025:2005(ES), 2009.
- [13] Reglamento (CEPE) n° 117 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas: disposiciones uniformes relativas a la homologación de neumáticos por lo que se refiere a las emisiones de ruido de rodadura, a la adherencia en superficie mojada y/o a la resistencia a la rodadura [2016/1350], 2016. URL <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs.html>.
- [14] A. N. Gent and J. D. Walter. *The pneumatic tire*. The University of Akron, 2006.
- [15] European Tyre and Rim Technical Organisation (ETRTO). *Standards Manual*. 2006. URL <https://books.google.es/books?id=Rk-JnQEACAAJ>.
- [16] The Tire and Rim Association (TRA). *Year book*. 1985. URL <https://books.google.es/books?id=Rk-JnQEACAAJ>.
- [17] National Geographic TV. Tire creation. <http://www.natgeotv.com/ca/megafactories/videos/tire-creation>, 2013.
- [18] Grupo Michelin en América del Sur. Cómo se fabrica un neumático <http://www.michelin.com.ar>, 2014. URL <http://www.michelin.com.ar/AR/es/ayuda-y-asistencia/como-se-fabrica-un-neumatico.html>.
- [19] Miguel Sánchez and Marta Guzmán. *Análisis de la eficiencia medioambiental del recauchutado de neumáticos*. Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), 2013. ISBN 978-84-96297-92-0.
- [20] Una máquina de armar cubiertas para fabricar cubiertas de neumático, 1976.

- [21] Fabricación de neumáticos paso a paso URL [https://www.youtube.com/watch?v=y41Q-N\\_XR6U](https://www.youtube.com/watch?v=y41Q-N_XR6U).
- [22] Michelin - La fabricación del neumático. Obtenido de: URL <https://www.youtube.com/watch?v=IeyvHmB5IWY>.
- [23] National Geographic Documentary. Mega fábricas - Michelin. URL <https://www.youtube.com/watch?v=rFiJE94wFhc>.
- [24] Renato Caretta and Cristiano Bette. Procedimiento para la fabricación, moldeo y vulcanizado de neumáticos para ruedas de vehículos, 2004.
- [25] Tratamientos neumáticos usados SL (TNU), polígono industrial Carrús, C/ Almansa nº 10 - 2ª planta. 03206 Elche (Alicante), teléfono 902 179 180 - 965 43 95 11, fax 965 44 20 45 y email [info@tnu.es](mailto:info@tnu.es), 2006. URL <http://www.tnu.es>.
- [26] European Tyre and Rubber Manufacturers Association (ETRMA). *European tyre and rubber industry. Statistics 2016. Nº 8.* 2016.
- [27] Michelin, editor. *Libro blanco de Michelin.* [www.michelin.com](http://www.michelin.com), 2015.
- [28] Carlos Vera Alvarez, Francisco Aparicio Izquierdo, and Vicente Diaz Lopez. *Teoría de los vehículos automóviles.* ETS Ingenieros Industriales, 2ª edición edition, 2001. ISBN 9788474841466.
- [29] Samuel K. Clark. *Mechanics of pneumatic tires.* U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2nd edition edition, 1981.
- [30] Manufacture Française des Pneumatiques Michelin. *The tyre. Rolling resistance and fuel savings.* Société de Technologie Michelin, 2003.
- [31] J. Y. Wong. *Theory of ground vehicles.* Wiley, 2008.
- [32] International Organization for Standardization (ISO). Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de la resiliencia por rebote, (UNE-ISO 4662:2013), 2013.
- [33] Office of Regulatory Analysis, Evaluation National Center for Statistics, and Analysis. *Replacement tire consumer information program part 575.106. Final regulatory impact analysis.* National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2010.
- [34] Reglamento (CE) nº 1222/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de noviembre de 2009 sobre el etiquetado de los neumáticos en relación con la eficiencia en términos de consumo de carburante y otros parámetros esenciales (Texto pertinente a efectos del EEE), 2009. URL <http://data.europa.eu/eli/reg/2009/1222/2012-05-30>.
- [35] K. A. Grosch. The rolling resistance, wear and traction properties of tread compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, 69(3):495–568, 1996. doi: 10.5254/1.3538383. URL <https://doi.org/10.5254/1.3538383>.

- [36] K.H. Nordsiek. The “integral rubber” concept – an approach to an ideal tire rubber. In *Kautschuk und Gummi Kunststoffe*, editor, *Kautschuk und Gummi Kunststoffe 38*, pages 178–185, 1985.
- [37] W. Kaewsakul, K. Sahakaro, W. K. Dierkes, and J. W. M. Noordermeer. Optimization of rubber formulation for silica-reinforced natural rubber compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, 86(2):313–329, 2013. doi: 10.5254/RCT.13.87970. URL <https://doi.org/10.5254/RCT.13.87970>.
- [38] Ping Zhang, Michael Morris, and Dhaval Doshi. Materials development for lowering rolling resistance of tires. *Rubber Chemistry and Technology*, 89(1):79–116, 2016. doi: 10.5254/rct.16.83805. URL <https://doi.org/10.5254/rct.16.83805>.
- [39] D. J. Schuring and G. L. Hall. Ambient temperature effects on tire rolling loss. *Rubber Chemistry and Technology*, 54(5):1113–1123, 1981. doi: 10.5254/1.3535849. URL <https://doi.org/10.5254/1.3535849>.
- [40] International Organization for Standardization (ISO). Passenger car, truck and bus tyres - Methods of measuring rolling resistance - Single point test and correlation of measurement results, ISO 28580:2009(E), 2009.
- [41] D. J. Schuring. The rolling loss of pneumatic tires. *Rubber Chemistry and Technology*, 53(3):600–727, 1980. doi: 10.5254/1.3535054. URL <https://doi.org/10.5254/1.3535054>.
- [42] P. S. Pillai and G. S. Fielding-Russell. Effect of aspect ratio on tire rolling resistance. *Rubber Chemistry and Technology*, 64(4):641–647, 1991. doi: 10.5254/1.3538579. URL <https://doi.org/10.5254/1.3538579>.
- [43] Committee for the National Tire Efficiency Study. Tires and passenger vehicle fuel economy. informing consumers, improving performance. In *Transportation Research Board Special Report 286*. Transportation Research Board of the National Academies, 2006.
- [44] J. R. Luchini, M. M. Motil, and W. V. Mars. Tread depth effects on tire rolling resistance. *Tire Science and Technology*, 29(3):134–154, 2001. doi: 10.2346/1.2135235. URL <https://doi.org/10.2346/1.2135235>.
- [45] Samuel K. Clark and Timothy C. Dodge. Rolling resistance measurements of new and retreaded truck tires. In *SAE Technical paper*. SAE International, 1982. doi: 10.4271/821268. URL <http://dx.doi.org/10.4271/821268>.
- [46] Ruud Spuijbroek (Director). Final report summary - RETYRE (Classification of retreaded truck tyres in order to comply with future environmental performance and safety requirements). Technical report, The consortium consists of 15 partners. Retrived from: <http://www.retyre-project.eu>, September 2015.

- [47] Larry R. Evans, Inc) John R. Harris (Transportation Research Center, and James D. MacIsaac Jr. (NHTSA). Tire fuel efficiency consumer information program development: Phase 1 – Evaluation of laboratory test protocols. Technical report, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2009.
- [48] V. Hublau and A. Barillier. The equations of the rolling resistance of a tire rolling on a drum. *Tire Science and Technology*, 36(2):146–155, 2008. doi: 10.2346/1.2917741. URL <https://doi.org/10.2346/1.2917741>.
- [49] J. R. Luchini. Rolling resistance test methods. In *Rubber division symposia, Vol. 1, American Chemical Society, Rubber Division*, volume 29, page 69–77, 1983. doi: 10.2346/1.2135235. URL <https://doi.org/10.2346/1.2135235>.
- [50] SAE International. Rolling resistance measurement procedure for passenger car, light truck, and highway truck and bus tires, (SAE J1269:2009-09), September 2006.
- [51] SAE International. Stepwise coastdown methodology for measuring tire rolling resistance, (SAE J2452:1999-06), June 1999.
- [52] International Organization for Standardization (ISO). Passenger car, truck, bus and motorcycle tyres - Methods of measuring rolling resistance, ISO 18164:2005, 2005.
- [53] International Organization for Standardization (ISO). Motorcycle tyres - Method of measuring rolling resistance, ISO 13327:1998, 1998.
- [54] International Organization for Standardization (ISO). Passenger car tyres - Methods of measuring rolling resistance, (ISO 8767:1992), 1992.
- [55] International Organization for Standardization (ISO). Truck and bus tyres - Methods of measuring rolling resistance, (ISO 9948:1992), 1998.
- [56] Anneleen Bergiers, Luc Goubert, Fabienne Anfosso-Lédée, Niels Dujardin, Jerzy A. Ejsmont, Ulf Sandberg, and Marek Zöller. Models for rolling resistance in road infrastructure asset management systems (MIRIAM project). Deliverable 3: Comparison of rolling resistance measuring equipment - Pilot study. Technical report, Swedish National Road and Transport Research Institute, 2011.
- [57] Jørgen Kragh. Rolling resistance - Copenhagen 2009 (Technical Note 77). Technical report, Road Directorate, Danish Road Institute, 2009.
- [58] M. S. Roovers, D. F. de Graaff, and R. K. F. van Moppes. Round Robin test rolling resistance. Energy consumption, 2005.
- [59] Stijn Boere. Prediction of road texture influence on rolling resistance. Master’s thesis, Eindhoven University of Technology, 2009.

- [60] D. J. Schuring and J. S. Redfield. Effect of tire rolling loss on fuel consumption of trucks. In *SAE Technical paper*. SAE International, 1982. doi: 10.4271/821267. URL <http://dx.doi.org/10.4271/821267>.
- [61] D. J. Schuring. Effect of tire rolling loss on vehicle fuel consumption. *Tire Science and Technology*, 22(3):148–161, 1994. doi: 10.2346/1.2139539. URL <https://doi.org/10.2346/1.2139539>.
- [62] D.J. Schuring. A new look at the definition of tire rolling loss. In *Society of Automotive Engineering*. Society of Automotive Engineering, Inc., 1977.
- [63] R. E. Knight. Correlation of truck tire rolling resistance as derived from fuel economy and laboratory tests. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 1982. doi: 10.4271/821266. URL <http://dx.doi.org/10.4271/821266>.
- [64] Ian M. Darnell. *An efficient three-dimensional tire model for predicting spindle loads*. PhD thesis, The University of Michigan, 2001.
- [65] B. G. Kao and M. Muthukrishnan. Tire transient analysis with an explicit finite element program. *Tire Science and Technology*, 25(4):230–244, 1997. doi: 10.2346/1.2137542. URL <https://doi.org/10.2346/1.2137542>.
- [66] S. R. Wu, L. Gu, and H. Chen. Airbag tire modeling by the explicit finite element method. *Tire Science and Technology*, 25(4):288–300, 1997. doi: 10.2346/1.2137545. URL <https://doi.org/10.2346/1.2137545>.
- [67] M. Koishi, K. Kabe, and M. Shiratori. Tire cornering simulation using an explicit finite element analysis code. *Tire Science and Technology*, 26(2):109–119, 1998. doi: 10.2346/1.2135960. URL <https://doi.org/10.2346/1.2135960>.
- [68] Joe Padovan, Amir Kazempour, Farhad Tabaddor, and Bob Brockman. Alternative formulations of rolling contact problems. *Finite Elements in Analysis and Design*, 11(4):275 – 284, 1992. ISSN 0168-874X. doi: 10.1016/0168-874X(92)90010-A. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168874X9290010A>.
- [69] Jose Ma López Martínez, Francisco Javier Sánchez Alejo, José Javier Páez Ayuso, and Adolfo Díaz Carrasco. Estudio del comportamiento de neumáticos recauchutados bajo condiciones estables de carga-velocidad en banco de pruebas. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 83(8), 2008.
- [70] John W Tukey. Exploratory data analysis. 1977.
- [71] International Organization for Standardization (ISO). Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 4: Basic method for the determination of the trueness of a standard measurement method, (ISO 5725-4:1994), 1994.

- [72] IBM SPSS Advanced Statistics v24 (Computer Software), 2016. URL <https://www.ibm.com/analytics/es/es/>.

